

Grado en Ingeniería Mecánica

2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Análisis de la transferencia de calor de la góndola de un globo estratosférico”

Jorge Sánchez Pérez

Tutora:

Dra. Carolina Marugán Cruz

Leganés, 2018



RESUMEN

La presente memoria, corresponde al estudio realizado sobre el análisis térmico en las distintas paredes de una góndola perteneciente a un globo estratosférico, mediante un análisis numérico empleando el software de cálculo Matlab, a fin de determinar las diferentes temperaturas en función de la altura, en cada una de las caras durante la fase de ascenso, tratándose así de un estudio transitorio.

Se incluirá una serie de estudios previos realizados con una temática similar, se hará hincapié en el contenido teórico referente a los distintos calores que intervienen en el balance de energía, además se analizarán los diferentes resultados obtenidos a partir de las modificaciones de ciertas variables que conforman el problema, comparándolos con otras investigaciones y se abordarán las consecuencias que tiene las temperaturas extremas en dispositivos electrónicos.

También se incluirá un marco regulador aplicable al problema y un entorno socio-económico, con el objetivo de incluir un presupuesto aproximado según los requerimientos de experimentos de esta índole.

Palabras clave: Análisis térmico transitorio, carga útil de globos de elevada altitud, fase de ascenso.

ABSTRACT

In the present document, a transient thermal analysis on the different walls of a high altitude balloon payload is carried out using Matlab software, with the aim of determining the temperature as a function of altitude in the ascent phase.

It will include a series of previous studies carried out with a similar theme, emphasis will be placed on the theoretical content referring to the different heats involved in the energy balance, as well as analyzing the different results obtained from the modifications of certain variables that make up the problem, comparing them with other investigations, and the consequences of extreme temperatures in electronic devices will be addressed.

It also includes, a regulatory framework applicable to the problem and a socio-economic environment with the aim of including an approximate budget according to the requirements of experiments of this nature.

Keywords: Transient thermal analysis, high altitude balloon payload, ascent phase.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Dra. Carolina Marugán Cruz por darme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación y, sobre todo, por guiarme a lo largo de la consecución del mismo, así como a Dr. Sergio Sánchez Delgado, por su ayuda desinteresada y el aporte de conocimiento que ha facilitado sustancialmente el desarrollo del trabajo.

A la Universidad Carlos III de Madrid, por formarme durante estos cuatro años en un campo tan apasionante como lo es la ingeniería mecánica y al gran equipo de profesionales docentes que han formado parte de mi educación a lo largo de este periodo.

A mi familia, que me ha apoyado en los momentos buenos, pero sobre todo ha sido un pilar imprescindible en los momentos más duros, a mis seres queridos y por supuesto a mis amigos, que han ayudado a evadirme y a disfrutar de la vida en cada instante que les necesitaba.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Introducción y Estado del arte	1
1.1 Introducción	1
1.2 Estado del arte	8
2. Motivación y Objetivos	12
3. Planteamiento del problema y Desarrollo teórico	15
3.1 Balance de energía	16
3.2 Modelo atmosférico	18
3.3 Transferencia de calor por radiación.....	19
3.3.1 Potencia térmica infrarroja absorbida.....	21
3.3.2 Potencia térmica solar directa.....	24
3.3.3 Albedo	26
3.4 Convección	27
4. Proceso analítico	33
4.1 Ecuaciones de gobierno	33
4.2 Algoritmo de resolución	39
4.3 Condiciones iniciales y de contorno	40
5. Análisis y discusión de los resultados	43
6. Marco regulador y Entorno socio-económico	55
6.1 Marco regulador.....	55
6.1.1 Propiedad intelectual	58
6.2 Entorno Socio-Económico	59
6.2.1 Presupuesto para la elaboración del TFG.....	59
6.2.2 Impacto socio-económico	60
7. Conclusiones	62
8. Trabajos futuros	64
Bibliografía.....	65
ANEXO A: Código Matlab.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Proyecto eclipse solar NASA	6
Fig. 2 Disminución de la vida de dispositivos electrónico con el aumento de la temperatura ...	7
Fig. 3 Capacidad y vida de las baterías en función de la temperatura	7
Fig. 4 Perfil de temperaturas atmosférico	9
Fig. 5 Globo alta altitud	12
Fig. 6 Caso de estudio.....	16
Fig. 7 Disposición equipos electrónicos.....	17
Fig. 8 Conducción inexistente por pared adiabática	17
Fig. 9 Factor de visión entre dos superficies diferenciales	21
Fig. 10 Factor de visión cara superior y Tierra.....	22
Fig. 11 Factor de visión cara lateral y Tierra.....	23
Fig. 12 Factor de visión cara inferior y Tierra	23
Fig. 13 Ángulo de elevación solar θ_s , y acimutal θ_z	25
Fig. 14 Velocidades cara lateral.....	29
Fig. 15 Velocidades cara superior.....	29
Fig. 16 Correlaciones cara superior	30
Fig. 17 Esquema simplificado del perfil aerodinámico de la góndola	31
Fig. 18 Flujo inferior sobre placa caliente	31
Fig. 19 Algoritmo de resolución	39
Fig. 20 Grafico que demuestra la velocidad de ascenso constante	41
Fig. 21 Variación de velocidad de ascenso según hora de lanzamiento y rango de altura	42
Fig. 22 Potencias térmicas cara superior.....	43
Fig. 23 Potencias térmicas cara lateral.....	44
Fig. 24 Potencias térmicas cara inferior	44
Fig. 25 Temperatura ambiente en función de la altura.....	45
Fig. 26 Temperatura del cielo en función de la altura.....	46

Fig. 27 Influencia de la emisividad en la cara superior	46
Fig. 28 Influencia de la emisividad en la cara lateral	47
Fig. 29 Influencia de la emisividad en la cara inferior	47
Fig. 30 Influencia de la absorptancia en la cara superior	48
Fig. 31 Influencia de la absorptancia en la cara lateral	48
Fig. 32 Influencia de la absorptancia en la cara inferior	49
Fig. 33 Influencia de la velocidad en la cara superior.....	49
Fig. 34 Influencia de la velocidad en la cara lateral.....	50
Fig. 35 Influencia de la velocidad en la cara inferior	50
Fig. 36 Influencia de la velocidad sobre la temperatura en la cara lateral	51
Fig. 37 Influencia de la altura solar en la cara superior	51
Fig. 38 Influencia de la altura solar en la cara lateral	52
Fig. 39 Influencia de la altura solar en la cara inferior	52
Fig. 40 Temperatura cara superior día y noche.....	53
Fig. 41 Temperatura cara lateral día y noche.....	53
Fig. 42 Temperatura cara inferior día y noche	54
Fig. 43 Ejemplo zonas peligrosas AIP	56
Fig. 44 Ejemplo zonas peligrosas AIP.....	56
Fig. 45 Ejemplo zonas restringidas AIP	56
Fig. 46 Ejemplo zonas temporalmente segregadas AIP.....	57
Fig. 47 Mapa Insignia ENAIRE AIP.....	57
Fig. 48 Fracaso de proyecto por congelación de dispositivos	61
Fig. 49 Temperaturas en las diferentes caras de la góndola	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Modelo ISA	18
Tabla 2 Métodos para el cálculo de la temperatura efectiva del cielo	19
Tabla 3 Constantes utilizadas	40
Tabla 4: Costes totales del proyecto	60

1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

En este primer capítulo, se aporta una visión general de la historia acerca de las investigaciones meteorológicas que han llevado al desarrollo y utilización de los globos estratosféricos, los cuáles serán definidos y analizados, y se incluirá una serie de estudios térmicos íntimamente relacionados con estos vehículos.

1.1 Introducción

Desde la edad griega, alrededor del año 340 a. C., el afán de los intelectuales por conocer el comportamiento de la naturaleza y el cielo, así como los astros, les llevó a escribir sus primeras memorias acerca del origen de los fenómenos atmosféricos y celestes, realizando hipótesis, sobre todo, de la previsión del tiempo, basándose en las observaciones de las constelaciones.

Con el tiempo, el desarrollo de instrumentos meteorológicos más precisos, permitieron conocer con mayor exactitud el conocimiento de la atmósfera. Galileo construye en 1607 el primer termómetro, seguido del barómetro inventado en 1643 por Torricelli. La dependencia de la presión atmosférica con la altura es planteada por Pascal y Descartes y es profundizada por E. Halley. La velocidad del viento era posible conocerla gracias a R. Hooke, mientras que un siglo después, con el Higrómetro de cabello, se podía medir la humedad. Con todos estos avances, Benjamin Franklin fue pionero en la predicción del tiempo sobre base diaria. Estudios posteriores se centraron en el conocimiento de los vientos y su origen, las nubes y las precipitaciones, hasta que en 1922 Lewis Fry, fue capaz de desarrollar un modelo matemático de probabilidad para acertar con mayor seguridad el comportamiento del tiempo [1].

El avance tecnológico tras las guerras mundiales, hizo que en 1960 se lanzase el primer satélite meteorológico TIROS-1 y el ímpetu humano por alcanzar el cielo y estudiar los cuerpos celestes, llevaron al desarrollo exponencial de misiones atmosféricas y espaciales donde la física y la ingeniería, jugaban un papel fundamental para lograr los objetivos marcados, y diseñar aeronaves seguras que facilitasen las investigaciones.

Los globos científicos, también conocidos en inglés como *Long duration balloons* o *High altitude balloons*, han sido utilizados durante décadas para infinidad de estudios íntimamente relacionados con la atmósfera, el sol, las telecomunicaciones, o como plataformas de desarrollo para futuras misiones espaciales [2]. Es característica su capacidad de realizar vuelos de larga duración y de forma estable durante periodos largos de tiempo frente a otras aeronaves, además de poder alcanzar las capas más altas de la atmósfera terrestre. Son muchas sus ventajas, principalmente en términos económicos, pues los costes de las misiones de lanzamiento suponen un ahorro importante frente al uso de otros vehículos espaciales, como cohetes sonda o aviones. Otro aspecto relevante, es el hecho de poder recuperar la carga útil tras finalizar el experimento, siendo posible realizar un análisis de las mediciones tomadas durante el mismo [3].

¿Qué es y para qué sirve un globo estratosférico?

Un globo estratosférico es un vehículo aéreo de transporte instrumental, en cuyo interior se aloja un gas menos denso que el aire exterior, habitualmente helio o hidrógeno, cuyo

funcionamiento se basa en el principio de Arquímedes, por medio del empuje ascensional que ejerce el gas más liviano. Es capaz de alcanzar los 50 Km de altura y permanecer a una altitud constante durante meses según las especificaciones técnicas del mismo [4].

Aplicaciones más comunes agrupadas según el campo de estudio. [3], [4]:

- **Uso atmosférico**

Determinación de las proporciones atmosféricas mediante el uso de radiómetros y métodos como la espectroscopia y cromatografía, además de su composición. Contemplación de *sprites* o fenómenos eléctricos y recopilación de datos de masas de aire y patrones de circulación atmosférica.

- **Uso en el ámbito de las telecomunicaciones**

Implementación de dispositivos GPS, señales de radio, radares, etc.

- **Uso astrofísico y astronómico**

Análisis de las distintas fuentes de radiación infrarroja, tanto rayos gamma como rayos X. Estudio del sol, su corona e interacción con la magnetosfera, observación de cuerpos celestes y del fondo cósmico.

- **Uso meteorológico**

Obtención de datos como la presión, la humedad, la densidad, la altura, velocidad dirección del viento y la temperatura entre otros.

- **Uso audio-visual**

Capturas fotográficas, grabación de misiones, exploración geográfica.

- **Uso militar**

Reconocimiento de puntos estratégicos, comunicación e inteligencia electrónica, estudio y detección de explosiones y utilización de globos como blancos móviles.

- **Prototipos**

Implementación en la carga útil de dispositivos usados en futuras misiones de mayor envergadura u otras aplicaciones como paracaídas y calibración de celdas solares.

- **Aeronáutica**

Generación de ambientes de micro-gravedad por caída libre, coeficientes de rozamiento y aerodinámicos.

Tipos de globos estratosféricos

Una clasificación básica de los globos científicos puede abordarse según sean abiertos o cerrados, aunque cabe destacar, que son innumerables las agrupaciones que pueden hacerse debido al gran número de variantes que existen según su forma, tamaño, métodos de construcción, materiales, etc. [3]

Los globos abiertos o también denominados de presión cero, tienen su parte inferior abierta como su nombre indica, por lo que a medida que ascienden, el gas del interior alcanza el equilibrio con la presión del exterior. Las principales características de estos tipos de globos, es que son capaces de elevar cargas muy pesadas (del orden de 3 Toneladas) con una duración máxima de vuelo de una a tres semanas, son idóneos para realizar ascensos verticales y su aterrizaje puede ser controlado.

Por otro lado, los globos cerrados o también llamados globos de “superpresión”, son totalmente estancos, la presión del interior va ascendiendo a medida que se incrementa la altura de vuelo. Esta “superpresurización” es soportada por la envoltura reforzada, expandiéndose hasta alcanzar su punto máximo, produciéndose así el equilibrio de presiones, que limita su altura de elevación. En estos globos, destacan los vuelos de varios meses de duración a un nivel de altitud constante, pero la carga útil es más limitada que en los anteriores.

Las misiones a su vez pueden clasificarse en tres categorías según su duración [2]:

- **Misiones convencionales**

Normalmente usadas para la recolección de datos meteorológicos, o necesarias para analizar estudios concretos que no requieran largos periodos de durabilidad. Los equipos electrónicos empleados por lo general son de transmisión directa. El tiempo de duración de estos vuelos suelen ser de unas horas o pocos días.

- **Misiones de larga duración**

También denominadas por sus siglas en inglés LDB (*Long duration ballooning*), por lo general son utilizadas para la obtención de datos o realización de experimentos, que requieran recorrer grandes trayectorias (intercontinentales), durante un largo periodo de tiempo. Las cargas útiles transportan equipos electrónicos basados en satélites para la geolocalización de los mismos.

- **Misiones ULDB (*Ultra long duration ballooning*)**

Llevadas a cabo por globos súper-presurizados, su objetivo no es otro que el de recopilar inmensas cantidades de datos y suelen tener una duración superior a los 100 días.

Componentes básicos de un globo estratosférico

Todo globo científico está compuesto por, el globo en sí, encargado de la elevación y sustentación del sistema, y la góndola que transporta la carga útil.

Además, para que un vuelo se desarrolle con éxito, debe incluir los siguientes subsistemas:

- Paracaídas para la recuperación tras el aterrizaje.
- Mecanismo de accionamiento de paracaídas para la recuperación de la góndola.
- Sistemas de alimentación eléctrica para los posibles dispositivos electrónicos.

Los sistemas de comunicación, los distintos aparatos de medición y los dispositivos electrónicos dependerán del fin con el que se lance el globo.

Ventajas y desventajas de los globos estratosféricos

La principal ventaja del uso de estos vehículos, es el sustancial ahorro económico que se produce frente al empleo de otras aeronaves para misiones o experimentos que pueden llevarse a cabo con los globos. Otro aspecto relevante, es la posibilidad de poder recuperar la carga útil tras finalizar el vuelo, en caso de que el usuario lo haya tenido en cuenta previamente en su diseño. Por otro lado, la construcción de los mismos no requiere de técnicas sofisticadas (por lo general), como en el caso de cohetes sonda, satélites o aviones, ni de ingeniería de funcionamiento compleja. La altura a la que son capaces de llegar es otro aspecto a tener en cuenta, pues son capaces de ascender hasta la región atmosférica denominada “Espacio próximo” o *Near Space* en inglés. La durabilidad de las misiones y su escaso mantenimiento (siempre dependiendo de la índole de las mismas) son factores relevantes para su empleo.

En contraposición, la gran dependencia a factores medioambientales es un hándicap que debe tenerse en cuenta, tanto en el lanzamiento como en el periodo de sustentación, pues las rachas de vientos son aleatorias tanto en dirección como en velocidad, así como las tormentas y precipitaciones. Aunque muchas misiones hacen un estudio previo de predicción, nunca se sabe con exactitud el recorrido que la aeronave va a realizar, complicando entre otros, su recogida tras el aterrizaje. Por otro lado, las temperaturas extremas que se alcanzan en la atmósfera hacen necesario el estudio térmico del sistema, tanto para evitar temperaturas muy bajas, como sobrecalentamientos en el interior de los aislantes del tren de carga. La fragilidad de la película del globo, puede llevar al fracaso de la misión por agentes externos a la misma, y se debe tener especial precaución con la manipulación de los gases de sustentación, pues son altamente inflamables. Por último, aunque ciertos globos por sus características pueden elevar del orden de 2 o 3 toneladas, la carga útil de estos dispositivos es más limitada que en otro tipo de aeronaves.

Lanzamientos relevantes

El primer experimento conocido con un globo de hidrógeno, fue llevado a cabo en 1783 por el profesor francés Jacques Charles, por aquel entonces tardó 5 días en rellenar el globo, y fue capaz de volar 12 millas en 45 minutos. No se llevaron equipos electrónicos a bordo por la inexistencia de los mismos, pero su lanzamiento fue el que promovió el uso de hidrógeno como gas de elevación para los futuros experimentos que tendrían lugar hasta el día de hoy [4].

En la actualidad, *The US National Weather Service* lanza cada año alrededor de 70000 globos por lo que el uso de estos dispositivos aéreos está muy extendido [4].

A fin de dar a conocer, que tipo de misiones reales pueden llevarse a cabo con estos globos, a continuación, se presentarán de forma breve algunas de ellas.

- **Red Bull Stratos**

El 14 de octubre de 2012, Felix Baumgartner realizó un salto desde los 38969 metros, y superó la velocidad del sonido en caída libre. Este evento fue posible por un proyecto llevado a cabo por Red Bull, una marca de bebidas energéticas íntimamente ligada al mundo del deporte. El medio utilizado para transportar al protagonista hasta la altura mencionada, fue un globo estratosférico. El fin del proyecto, no era únicamente una

campaña de marketing, además se recopilaban datos biológicos de la exposición del cuerpo humano a velocidades supersónicas para futuras misiones espaciales, que fueron analizados junto al Centro Científico de California situado en Los Ángeles. En el acontecimiento, varios records mundiales fueron batidos [5].

- **Proyecto Loon Google**

Más de la mitad de la población mundial no tiene acceso a internet. El proyecto *Loon* llevado a cabo por la compañía Google, tiene como objetivo llevar conexión de alta velocidad a los lugares más remotos del planeta, con la ayuda de los gobiernos y teleoperadores de estas zonas [6].

Estos globos están equipados básicamente con:

- Transceptores*: Transmiten la conectividad desde las estaciones terrestres, hacia los globos y de estos, a los teléfonos equipados con tecnología LTE.

- Paneles solares*: Empleados para el abastecimiento energético de los equipos electrónicos.

- Paracaídas*: Accionados automáticamente para un aterrizaje seguro.

- Cápsula de vuelo*: Localiza los aparatos electrónicos que hacen posible la consecución de la misión.

El lanzamiento de estos globos se hace de manera automática por medio de una grúa, que es capaz de lanzarlos con una cadencia de 30 minutos.

La recuperación de los mismos es posible gracias al uso de tecnología *Tracking* (seguimiento) por medio de GPS.

- **NASA's ECLIPSE BALLOONING PROJECT**

El proyecto llevado a cabo por la NASA y otros organismos colaboradores, tenía como objetivo estudiar un eclipse solar producido en 2017. Para ello, organizó un evento en el que participaron 55 equipos de distintos estados, a fin de acercar a los estudiantes al desarrollo de nuevos proyectos y retransmitir públicamente a tiempo real por primera vez en la historia, un acontecimiento de estas magnitudes [7].

Aprovechando alguno de los lanzamientos, tuvo lugar otra misión. Esta misión tenía como meta exponer microorganismos en condiciones dadas en la estratosfera, debido a su analogía con las condiciones extremas que pueden darse en Marte, muy bajas presiones y temperaturas, además de la alta radiación y sequedad.

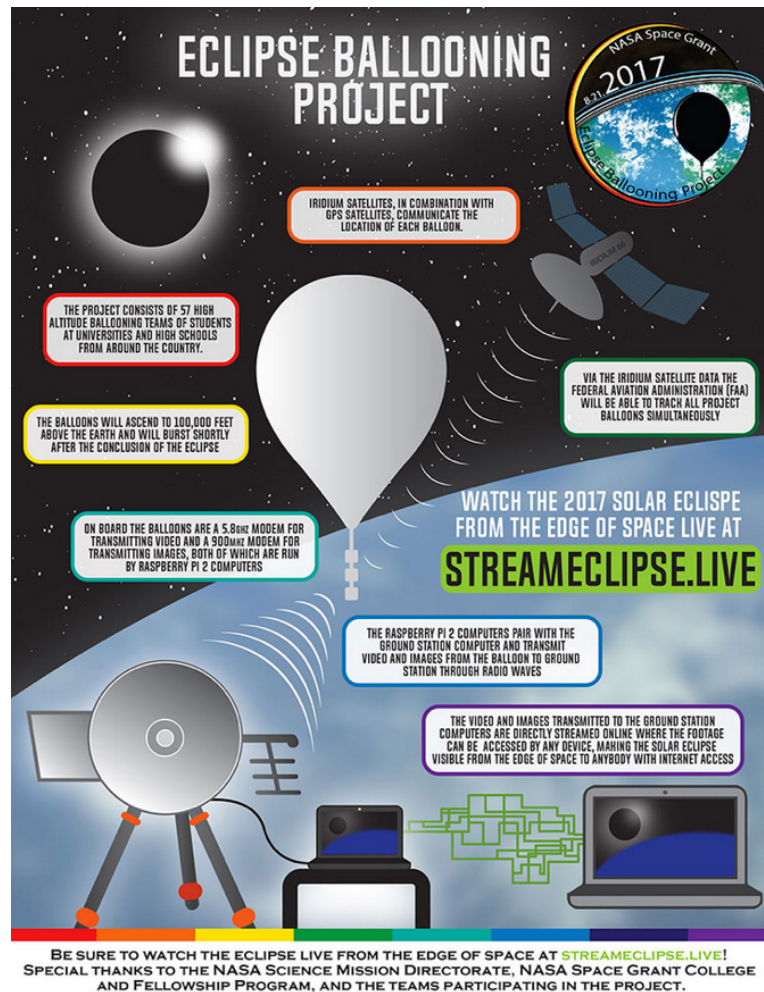


Fig. 1 Proyecto eclipse solar NASA [7]

La temperatura y los equipos electrónicos

El correcto funcionamiento de los aparatos electrónicos transportados en los globos, puede verse comprometido por las altas o bajas temperaturas que se alcancen en los mismos.

Las altas temperaturas en este tipo de experimentos, pueden darse por el ininterrumpido funcionamiento de los aparatos electrónicos durante largos periodos de tiempo, los cuales disipan la potencia eléctrica consumida en forma de calor por el denominado efecto Joule. Si el diseño de los disipadores de calor y de las zonas donde se alojan los dispositivos, no es el adecuado, las temperaturas alcanzadas harán estragos en la misión. Aunque el ambiente pueda estar a -70°C , si hay dispositivos alojados en un cerramiento casi completamente adiabático, es cuestión de tiempo que se alcancen elevadas temperaturas.

Por otro lado, que se den muy bajas temperaturas en las superficies de las góndolas es un hecho, como va a ser demostrado en el presente estudio. Esto lleva a que los conjuntos electrónicos que se sitúen en estas zonas de la carga útil, presenten riesgo de congelación y que ello lleve a su inoperatividad.

- **Altas temperaturas**

En un estudio realizado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, son las altas temperaturas el motivo más común que hace que los sistemas electrónicos no se comporten adecuadamente [8].

Datos demuestran que el incremento en 10°C sobre la temperatura para la que ha sido diseñada un aparato electrónico, puede reducir su vida de funcionamiento a la mitad, mientras que disminuir las mismas unidades, puede incluso duplicarla [9].

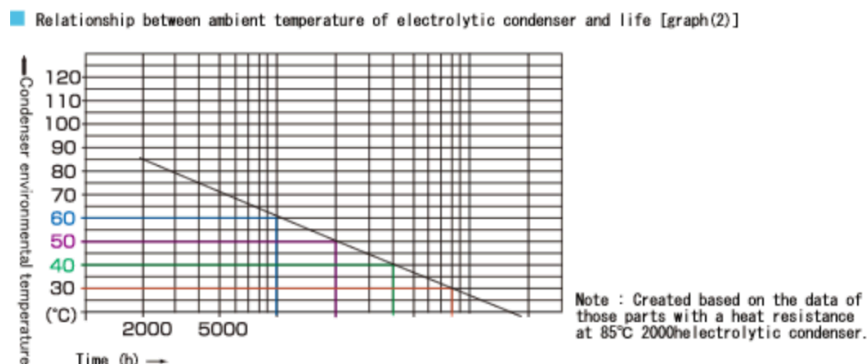


Fig. 2 Disminución de la vida de dispositivos electrónico con el aumento de la temperatura [10]

- **Bajas temperaturas**

Las bajas temperaturas pueden mejorar el comportamiento de ciertos semi-conductores, sin embargo, las baterías que alimentan a los equipos electrónicos ven disminuida su capacidad cuando operan a bajas temperaturas (ver Fig.3).

Por otro lado, no se trata de una simple cuestión de fallo electrónico, las bajas temperaturas requieren comportamientos mecánicos adecuados de los materiales en los que son implementados los circuitos.

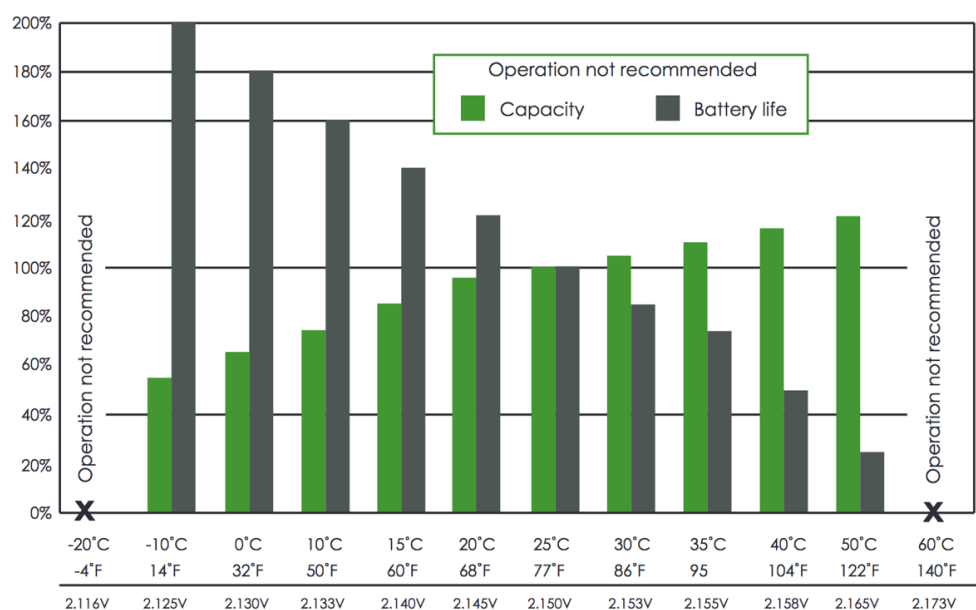


Fig. 3 Capacidad y vida de las baterías en función de la temperatura [11]

1.2 Estado del arte

Los lanzamientos de globos de alta altitud durante la última década son cada vez más numerosos, y la gran variedad de misiones en las que pueden ser útiles, hacen que el desarrollo tecnológico de los mismos sea de gran interés para que se alcance con el mayor éxito posible, la meta de cada experimento.

Uno de los principales estudios que deben realizarse durante la fase de diseño del globo, es el análisis térmico, pues en las distintas etapas de su recorrido a lo largo de la misión, existen numerosos riesgos que deben tomarse en cuenta para el correcto funcionamiento.

Se deberá separar este análisis en dos partes, un análisis térmico del globo, donde el objeto de interés será el comportamiento que el gas de su interior adopte en función de la temperatura y presión que alcance, y por otro lado, un análisis térmico de la carga útil, donde se debe estimar que temperaturas se darán, para poder así elegir los componentes. Ambos análisis tendrán gran similitud a la hora de calcular las distintas potencias térmicas que intervienen en el sistema.

Conocer el perfil térmico en un globo de estas características, converge en una mayor predicción del comportamiento de estas esferas durante su vuelo y ayuda a evitar el daño que pueda ocasionarse en el material que contiene el gas.

Paralelamente, las condiciones de estrés (*stress conditions*) que pueden darse en las góndolas dependerán de la fase de vuelo [12].

- **Área de trabajo**

En la zona previa al lanzamiento, existen ciertos riesgos térmicos derivados por las necesidades, bien de calentamiento o enfriamiento de la zona de trabajo, para el confort de los integrantes.

En el periodo de verano, una góndola fría, llevada al lugar del ensayo en un día caliente y húmedo, puede ser afectada por la condensación.

- **Zona de lanzamiento**

En lugares donde las temperaturas alcanzan los 50°C, hacen que las baterías y los equipos electrónicos se vean perjudicados.

- **Ascenso**

Se puede producir congelación de la condensación previa producida. Además, las temperaturas que rondan los -70°C pueden ser cruciales para dejar los sistemas inoperativos (ver Fig. 4).

- **Condiciones de flotación**

En el periodo diurno, a las alturas alcanzadas por la góndola, teniendo en cuenta que ha dejado atrás más del 99% de la atmósfera, la protección contra la radiación directa es escasa y se dan diferencias de temperaturas entre zonas expuestas directamente al sol y zonas con sombra.

○ **Descenso**

Condiciones muy parecidas a las que se dan en la fase de ascenso antes explicada. El rápido enfriamiento que sufre la góndola durante la caída puede llevar a la condensación, congelación e incluso corrosión (si la caja no es desmontada y limpiada pronto después del vuelo).

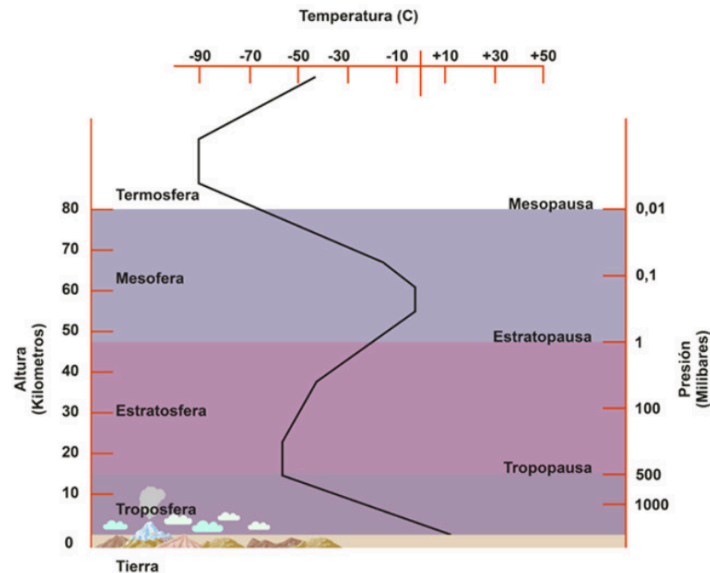


Fig. 4 Perfil de temperaturas atmosférico [13]

Por ello, numerosas investigaciones han sido llevadas a cabo para poder predecir la temperatura en las distintas partes de los globos estratosféricos. A continuación, se hará un recorrido por algunos de los estudios que se han hecho en este campo, recopilando brevemente los distintos objetivos, métodos de resolución y conclusiones obtenidas de cada uno de ellos, que han aportado de alguna forma conocimiento y herramientas para el desarrollo del presente trabajo.

En la década de los noventa y durante los primeros años del siglo XXI, H.M Cathey Jr. y el investigador Carlson L.A., realizaron numerosos estudios y avances en el campo del comportamiento térmico de los globos estratosféricos, donde se hizo especial hincapié en el análisis de la envoltura y el gas de sustentación, pudiendo así predecir parámetros de ascenso. Por aquel entonces la tecnología computacional era limitada y por tanto, el número de nodos que podían ser estudiados en los programas de elementos finitos eran reducidos, no obstante, la predicción térmica era bastante acertada, y se asentaron unas bases teóricas sólidas para los futuros estudios.

La mayoría de investigaciones en este campo se han centrado en la parte del globo en sí (envoltura y gas) y ha habido dos corrientes bien diferenciadas pero con objetivos similares. Por un lado, los estudios de naturaleza analítica, en los que se plantean ecuaciones de transferencia de calor y se resuelven mediante softwares matemáticos. El principal objetivo de estos estudios, es poder predecir la temperatura de manera asequible sin utilizar paquetes informáticos complejos. Por otro lado, se encuentran los estudios realizados con programas de elementos finitos, en los que se plantean unas condiciones iniciales y se explica cómo debe ser implementado el problema en estos programas. Una vez obtenidos los datos, analizan distintas

variables y obtienen unas conclusiones que comparan por lo general con los datos recolectados de experimentos reales.

Dentro de la primera corriente, se incluyen los trabajos de Xin Lin Xia et al. [14], desarrollando un estudio en tres dimensiones, sobre el análisis térmico transitorio de un globo con forma esférica en la fase de flotación (cuando el globo ya ha alcanzado su altura máxima). Las conclusiones de su estudio afirman, que la temperatura en las distintas partes de la esfera no es uniforme, dándose variaciones máximas de 30°K, además varía significativamente con el tiempo, y la diferencia de temperaturas entre el día y la noche pueden alcanzar los 50°K. Por otro lado, la temperatura de la envoltura se incrementa rápidamente en el amanecer y decrece de manera más pronunciada cuando el sol se pone, por lo que se puede afirmar, que la temperatura es función tanto del ángulo acimutal, como de la altura de solar. Analizando el gas, la variación térmica no es lineal con el tiempo, y la diferencia entre la temperatura de la envoltura y del gas puede alcanzar los 20°K. Kun Zhao [15], realizó un estudio similar, pero en condiciones estacionarias y analizando con mayor precisión, la convección natural en el interior del globo. Las conclusiones entre ambos estudios presentan grandes similitudes.

Otros investigadores como Qiumin Dai et al. [16] afirman que fallar en las predicciones de temperatura del envoltorio del globo, puede afectar a la vida del experimento, mientras que una mala precisión en la temperatura del gas, puede suponer un exceso o defecto del mismo en el lanzamiento, impidiendo que el globo ascienda a la altura deseada o explote antes de alcanzarla. Ambas situaciones crean potenciales riesgos, que hacen que las misiones no se completen. Siguiendo la línea de estudios anteriores, Qiumim pretende dar un paso más allá, analizando situaciones en las que el cielo no esté completamente despejado, por tanto, las propiedades radiactivas de las nubes cobran gran importancia en su estudio como también lo hacen las de la piel del globo. Al igual que Yi Zhang et al. [17] junto al análisis térmico, realizan un modelo dinámico que, gracias a los datos obtenidos de la transferencia de calor, puede predecir el ascenso del globo, aportando la altura y el tiempo además de las distintas presiones que se alcanzan en su interior. Las conclusiones generales obtenidas de ambas investigaciones, demuestran que la absorptancia y la emisividad, son factores relevantes a tener en cuenta, pues afectan sustancialmente al comportamiento térmico de los globos. El incremento de la temperatura del helio, lo hace junto al incremento de la absorptancia, mientras que el incremento de la emisividad, reduce las diferencias de temperaturas que puedan darse en el propio gas. En términos de la envoltura del globo, un bajo ratio entre absorptividad y emisividad es el deseable. Por último, las nubes en horario nocturno siempre hacen que la temperatura del gas descienda.

En la corriente de estudios realizados con soporte de programas de elementos finitos, destaca el realizado por J.D. Soler [18], en el que una carga útil utilizada en una misión en la Antártida, es simulada y analizada térmicamente con ayuda de los programas SINDA/FLUINT, Thermal Desktop y RadCAD, en los cuales se introduce un diseño previo realizado en un módulo CAD y se analiza imponiendo unas condiciones de contorno. En la investigación se calcula las temperaturas de los distintos dispositivos, estando o no en funcionamiento durante la misión en condiciones transitorias, a fin de abordar las distintas soluciones que deben implementarse para el correcto funcionamiento de los aparatos.

Para terminar, es imprescindible mencionar el trabajo desarrollado por I. Pérez Grande et al. [19], por ser en el que principalmente se ha basado la presente memoria. En él, se ha desarrollado el análisis térmico de la góndola de un globo utilizado en la misión SUNRISE, en estado transitorio y es a partir del cual se intentarán obtener resultados parecidos y se analizarán otros parámetros para ampliar este estudio, pues es el único que determina la temperatura en la carga útil del globo de forma analítica.

2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS



Fig. 5 Globo alta altitud [20]

El departamento de ingeniería térmica y de fluidos, a principios de año decidió poner en marcha un proyecto liderado por Carolina Marugán, que consistía en el lanzamiento de un globo estratosférico con una carga útil aproximada de no más de 1,5 Kg. En la actualidad, un grupo de docentes y alumnos, está trabajando para poder hacer posible el lanzamiento. Son numerosos los retos planteados en el mismo, al igual que los estudios llevados a cabo en la misión. Para materializar el proyecto, la partición de trabajo en distintos grupos es fundamental para abordar todas las áreas de conocimiento. Varias son las ramas de la ingeniería implicadas en el globo estratosférico, desde el grupo aeroespacial, encargado del cálculo de la trayectoria del mismo a fin de poder predecir su recorrido, pasando por el grupo electrónico y de telecomunicaciones, que hacen posible el *tracking* y la implementación de todo el equipo necesario como las cámaras o aparatos de medición, siendo indispensable una programación para su procesamiento y posterior análisis. Otro equipo, es el encargado de calcular cuánto helio será necesario para alcanzar una cierta altura. El diseño de un dispositivo que separe el paracaídas de la carga útil por seguridad, es fundamental por no mencionar las numerosas mediciones de radiación y de otros parámetros que se llevarán a cabo y serán estudiados por los compañeros. Por otro lado, las condiciones extremas que se dan en estas misiones, hacen que el estudio y predicción de la temperatura tanto en el globo como en su carga útil, sean de vital importancia para la consecución óptima de la misión, ya que los equipos electrónicos transportados en la góndola pueden verse comprometidos, al no operar en rangos de temperaturas para los que fueron diseñados. Es este el aliciente por el que la presente memoria ha sido desarrollada. El hecho de poder formar parte de un grupo, cuyo fin es la puesta en marcha de un proyecto real y la oportunidad de aplicar el conocimiento adquirido durante el grado de ingeniería mecánica, en un experimento que se puede materializar, brindan una gran oportunidad para finalizar esta

etapa con un estudio útil no solo para este lanzamiento, sino también para otras misiones espaciales, que requieran del conocimiento de la temperatura en condiciones extremas, calculadas mediante un método sencillo y accesible para todo aquel que pretenda comprender la transferencia de calor en el ascenso de un vehículo aéreo.

A pesar de que los experimentos con estos dispositivos pueden durar días, semanas o meses, hay un intervalo relativamente corto de tiempo en el que las temperaturas en las cargas, alcanzan sus valores mínimos, se trata de la fase de ascenso. Es por ello, por lo que el fin de este estudio es analizar la transferencia de calor a medida que el globo asciende, convirtiéndose, por tanto, en un análisis transitorio.

Los **objetivos** del presente trabajo son los siguientes:

- Abordar las distintas aplicaciones de los globos científicos y los estudios referentes a análisis térmicos realizados previamente. En el capítulo 1 de la memoria, es donde ha sido desarrollado este punto, se han incluido los distintos campos de aplicación de estos vehículos, además de analizar las ventajas que los hacen idóneos para ciertas misiones y se han recogido numerosas investigaciones cuyo fin era la obtención y análisis del perfil de temperaturas en las distintas partes que conforman un globo de alta altitud.
- Desarrollo teórico de los conceptos necesarios, que hacen posible la obtención de la temperatura en función de la altura. Este objetivo es alcanzado en el capítulo 3, en el cual se desarrollan conocimientos propios de la transferencia de calor, donde se plantea en primera instancia, el balance de energía a resolver, otros parámetros imprescindibles a tener en cuenta como puede ser el modelo de atmósfera empleado y se aclararán las aproximaciones que han sido tomadas en cuenta, para facilitar la resolución del problema planteado.
- Desarrollo analítico para la obtención de los resultados requeridos y explicación del algoritmo llevado a cabo para su implementación en Matlab. Una vez indagada la teoría, en el capítulo 4, se pretende recoger de manera ordenada el conjunto de ecuaciones necesarias, para calcular la temperatura y que pasos se debe seguir en el software utilizado, para poder resolver la ecuación diferencial.
- Análisis y discusión de los resultados. En el capítulo 5, una vez resuelto el problema, se deberán estudiar diversas gráficas obtenidas cuyo fin es recoger la dependencia mutua entre variables que intervienen en la transferencia de calor, se compararán como alternativas de diseño, que influencia tiene localizar el conjunto de equipos electrónicos en las distintas caras de la góndola y además, se pretende realizar un barrido paramétrico de variables de operación, a fin de determinar su influencia sobre la temperatura, estudiando entre otras, la emisividad y absortancia de los posibles materiales que pueden utilizarse, la velocidad de ascenso y el ángulo solar.

- Presentación de la normativa vigente en experimentos de esta índole y desarrollo del entorno socio-económico. Con el objetivo de dar a conocer que normas pueden ser aplicables a los lanzamientos de globos estratosféricos y el conocimiento de la propiedad intelectual del presente trabajo, en el capítulo 6, se recoge esta temática junto al entorno socio-económico para ofrecer un presupuesto aproximado y analizar el impacto que tiene un estudio de estas características en la sociedad.

- Recopilación de trabajos futuros. A fin de optimizar y ampliar el presente estudio, en el último capítulo de la memoria, se pretende facilitar que aspectos del trabajo pueden ampliarse y estudiarse con un mayor detalle a fin de obtener resultados aún más precisos.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y DESARROLLO TEÓRICO

En el capítulo 3, se abordará desde el planteamiento del problema, hasta la indagación teórica de todos los parámetros necesario para la resolución del mismo, describiendo así las potencias térmicas que intervienen y las variables que las conforman.

<u>Índice de variables</u>	
A = Área de la cara	$T_{sky50Km}$ = Temperatura del cielo a 50 km s.n.m
L = Longitud característica	T_{amb} = Temperatura del ambiente
ε = Emisividad	T_{media} = Temperatura media
σ = Constante de Stefan Boltzmann	T_{sky} = Temperatura del cielo
G_{sout} = Irradiación solar extraterrestre	T = Temperatura de la cara de la góndola
$G_{s_{n.m}}$ = Irradiación solar s.n.m	F_{be} = Factor de visión entre la cara y la tierra
G_s = Irradiación solar	H = Altura
θ = Ángulo de elevación solar	P_{dis} = Potencia disipada por los equipos electrónicos
R_t = Radio terrestre	Q_{conv} = Potencia perdida por convección
$\rho_{n.m}$ =Densidad del aire s.n.m	$Q_{emitida}$ = Potencia emitida por la cara de la góndola
ρ = Densidad del aire	$Q_{infrabs}$ = Potencia infrarroja absorbido
Pr : Número de Prandtl	Q_{albedo} = Potencia obtenida a partir del albedo
μ =viscosidad del aire	Q_{direct} = Potencia procedente de la radiación directa
Re = N° de Reynolds	$Q_{solarabs}$ = Potencia total solar absorbida
Nu = N° de Nusselt	Q_{rad} = Potencia neta por radiación
K = Conductividad térmica del aire	Q_{net} = Potencia neta
h = Coeficiente de transferencia de calor	Q_{abs} = Potencia total absorbida por radiación
α = Coeficiente de albedo	ω = Velocidad de rotación de la góndola
α = Absortancia	Ra = N° de Rayleigh
m = Masa del conjunto del equipo electrónico	
c = Capacidad de calor específico	
T_t = Temperatura superficial de la tierra	
$T_{sky.n.m}$ = Temperatura del cielo s.n.m	
V = Velocidad de ascenso	

Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, el objetivo del estudio es la obtención de la temperatura en función de la altura. Se trata de un análisis transitorio donde se estudiarán las distintas caras de una góndola, y se modificarán ciertos parámetros para determinar su influencia sobre las temperaturas.

En la Fig. 6, se muestra de forma esquemática el experimento.

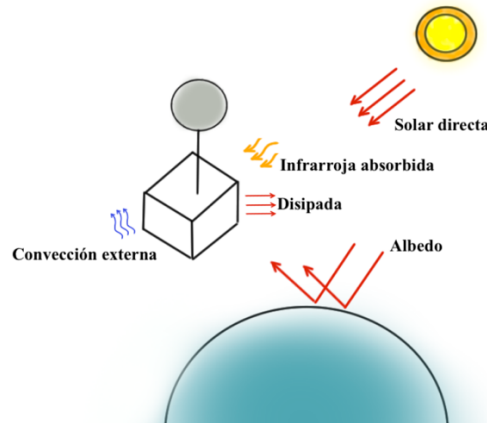


Fig. 6 Caso de estudio

El problema se basa en la resolución de la ecuación diferencial del balance de energía correspondiente a la cara a estudiar.

3.1 Balance de energía

$$mc \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{net} + P_{dis} \quad (1)$$

La masa pertenece al conjunto de equipos electrónicos que disipan potencia y no varía.

La capacidad calorífica específica de los componentes electrónicos, se corresponde a la cantidad de calor que tiene que ser suministrado a la unidad de masa del conjunto, para elevar su temperatura una unidad. Se considera constante siendo invariante con la modificación de variables como la temperatura.

Por simplicidad, se ha supuesto que el conjunto de dispositivos electrónicos, es un sistema homogéneo, como una especie de placa adyacente a las paredes de la góndola con sus mismas dimensiones. Ver Fig. 7.

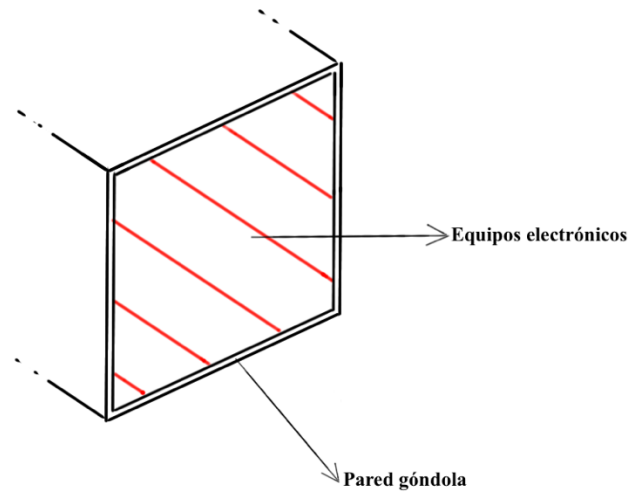


Fig. 7 Disposición equipos electrónicos

Los términos de la derecha de la Ecuación (1), son los correspondientes a las potencias. Por un lado, la potencia neta compuesta por la radiación y la convección, y por otro lado, la potencia disipada por los equipos electrónicos. El intercambio de calor entre la góndola y la placa no se estudia, pues las paredes de las mismas presentan una conductividad muy baja, por lo que son consideradas adiabáticas, es por ello, por lo que la conducción no se tiene en cuenta en este estudio. Las potencias emitidas serán utilizadas con signo negativo mientras que las absorbidas serán positivas.

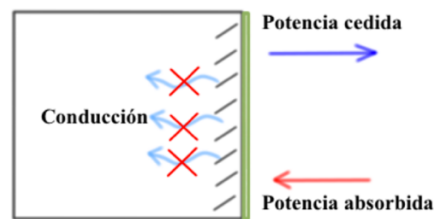


Fig. 8 Conducción inexistente por pared adiabática

Tanto el calor específico como la potencia disipada del conjunto electrónico, para su medición, requieren de una ciencia denominada calorimetría, que implica cualquier experimento tendente a evaluar la cantidad de calor transferido en un proceso [8]. Para ello se emplean unos dispositivos denominados calorímetros. Aunque en este estudio no se ha hecho uso de estos medidores ya que no es el fin del mismo, se explica brevemente cómo funcionan.

Se colocan los componentes electrónicos en el interior de una cámara porta-circuitos de alta conductividad térmica, rodeada de un fluido cuya masa y calor específico son conocidos. Para el cálculo de la disipación de calor se requiere un balance de energía. Para hallar la potencia calorífica emitida, se divide el resultado obtenido del balance entre el tiempo transcurrido. El sistema debe ser completamente adiabático (caso ideal), para que el fluido no varíe su temperatura debido a causas externas.

3.2 Modelo atmosférico

Con la intención de que el estudio llevado a cabo, pueda utilizarse de manera genérica en otras misiones, los datos atmosféricos que se emplean en el mismo, no se corresponden a datos de una determinada zona geográfica y día de lanzamiento, sino que son los recogidos por “The International Standard Atmosphere” (ISA). Se trata de un modelo atmosférico que es utilizado para determinar verticalmente, la temperatura, la presión y la densidad de la atmósfera.

Se trata de un estándar de la ISO 2533:1975.

Modelo matemático

Para el estudio, los parámetros atmosféricos necesarios serán, la temperatura ambiente y la densidad del aire. Sus expresiones matemáticas variarán según el intervalo de alturas en el que se encuentren con respecto al nivel del mar.

TABLA 1 MODELO ISA

$H < 11 \text{ Km}$	
$\rho = 1,1225 \left(\frac{288,15 - 6,5H}{288,15} \right)^{4,2558}$ $T_{amb} = 288,15 - 6,5H$	
$11 \leq H < 20 \text{ Km}$	
$\rho = 0,364 \times e^{-\frac{H-11}{6,34162}}$ $T_{amb} = 216,65$	
$H \geq 20 \text{ Km}$	
$\rho = 0,088 \left(\frac{216,65 + (H - 20)}{216,65} \right)^{-35,1632}$ $T_{amb} = 216,65 + (H - 20)$	
Temperatura en [°K]	Presión en [Pa]

Con respecto a la temperatura equivalente del cielo T_{sky} , empleada posteriormente para el cálculo de la potencia infrarroja absorbida, existen numerosos estudios que han determinado expresiones matemáticas para su obtención a partir de distintos parámetros. A continuación, se recogen algunas de estas expresiones en la TABLA 2.

TABLA 2 MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA TEMPERATURA EFECTIVA DEL CIELO

AUBINET [21]
<p>La temperatura es función de la presión de vapor del aire en condiciones ambiente, $P_{\text{vapor-out}}$, del factor de nubosidad $F_{\text{cloudiness}}$ y de la temperatura exterior T_{amb}:</p> $T_{\text{sky}} = 94 + 12,6 \ln(P_{\text{vapor-amb}}) - \frac{13F_{\text{cloudiness}}}{10 + 0,341(T_{\text{amb}} + 273)} - 273,15 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ <p>El factor de nubosidad se calcula como:</p> $F_{\text{cloudiness}} = 1 + 0,024I_N - 0,0035I_N^2 + 0,00028I_N^3$ <p>Donde I_N es el índice de nubosidad, definido como el cociente entre la radiación real medida experimentalmente y la radiación teórica correspondiente a la localidad:</p> $I_N = \frac{RD}{RD_{\text{teórica}}}$
DOE [21]
$T_{\text{sky}} = \varepsilon_{\text{sky}}^{0,25}(T_{\text{amb}} + 273,15) - 273,15 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$ <p>Donde ε_{sky} es la emisividad media del cielo calculada como:</p> $\varepsilon_{\text{sky}} = F_{\text{cloudiness}} \left[0,787 + 0,764 \ln \left[\frac{T_{\text{DEW}} + 273,15}{273,15} \right] \right]$ <p>Siendo T_{DEW} la temperatura de rocío del aire.</p>
Método aproximado [21]
$T_{\text{sky}} = T_{\text{amb}} - 10 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$
Yan and Zhao, 1986
$T_{\text{sky}} = (0,51 + 0,208\sqrt{P_{\text{vapor-amb}}})^{0,25}T_{\text{amb}} \text{ [}^{\circ}\text{K]}$
Método exponencial [19]
$T_{\text{sky}} = T_{\text{sky.n.m}} \exp \left[\ln \left(\frac{T_{\text{sky50Km}}}{T_{\text{sky.n.m}}} \right) \frac{H \text{ [Km]}}{50} \right] \text{ [}^{\circ}\text{K]}$

La expresión elegida para calcular la temperatura del cielo, es el método exponencial, ya que se tienen todos los valores necesarios para su obtención y además depende de la altura por lo que facilitará los cálculos.

3.3 Transferencia de calor por radiación

Todo cuerpo emite radiación a cualquier temperatura, sin necesidad de medio físico, la transferencia de calor se hace por medio de ondas electromagnéticas. La radiación tiene lugar en longitudes de ondas comprendidas entre 0,1-100 $[\mu\text{m}]$.

La ley de Stefan-Boltzmann establece la potencia total emitida por un cuerpo negro (bb):

$$P_{bb} = A_{bb}\sigma T_{bb}^4 \quad (2)$$

Siendo un cuerpo negro una superficie ideal, que garantiza la máxima emisión a cada temperatura y longitud de onda, y al ser un emisor difuso asegura la misma emisión para todas las direcciones, además realiza una absorción completa. No debe ligarse una superficie de color negro a un cuerpo negro.

La constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,670373 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ permite con el producto con la temperatura, obtener unidades de intensidad que corresponden a las de la potencia entre un área.

Un cuerpo negro es ideal, en la práctica el resto de superficies no tienen dicho comportamiento. Para determinar la potencia térmica emitida por radiación de estas superficies, se necesita conocer su emisividad. Las superficies de la góndola, se consideran superficies grises para altas longitudes de onda.

La emisividad, es un cociente entre la radiación emitida por una superficie a una determinada temperatura y la radiación emitida por un cuerpo negro a esa misma temperatura. Toma el rango de valores comprendidos entre (0,1). Existe numerosas tablas que recogen valores de emisividad para diversas superficies. Un método sencillo para medir de manera aproximada la emisividad de una superficie, consiste en primero, medir la temperatura con un termómetro de contacto de la superficie requerida y posteriormente utilizar una cámara termográfica con la emisividad ajustada a 1. La diferencia de temperatura debe irse graduando por medio de la emisividad para obtener la temperatura del termómetro de contacto.

La absorptancia α , es la fracción de la irradiación absorbida por una superficie y al igual que la emisividad sus valores están comprendidos entre (0,1).

La temperatura equivalente de la superficie de la Tierra, se puede calcular suponiéndola como un cuerpo negro, haciendo un balance de energía sobre su superficie, en él, que se iguala la potencia absorbida con la emitida. Para ello se debe determinar cuanta potencia es emitida por el Sol con la ley de Stefan-Boltzmann y cuanta de esa potencia es absorbida por la superficie terrestre. Otros parámetros a tener en cuenta es la energía retenida por la Tierra debido al efecto invernadero y la energía interna propia del planeta. Algunos estudios tras resolver el balance llegan a la siguiente expresión:

$$T_t = T_{sol} \left(\frac{(1 - \alpha)^{0,5}}{2D} R_{sol} \right)^{0,5} \quad [^{\circ}K] \quad (3)$$

Donde T_{sol} es la temperatura solar, y R_{sol} su radio, D por su parte es el radio de la órbita terrestre [22].

Para este estudio se ha estimado una temperatura terrestre de 260°K basándose en [23].

Con todo lo anterior, la potencia emitida por radiación por una de las caras de la góndola, se calculará mediante la ecuación (4).

$$\dot{Q}_{emitida} = A\varepsilon\sigma T^4 \quad (4)$$

3.3.1 Potencia térmica infrarroja absorbida

Además de los parámetros antes mencionados, $(\varepsilon, \sigma, \alpha)$ la potencia infrarroja absorbida depende del factor de visión.

El factor de visión F_{ij} , se define como la fracción de radiación que deja un cuerpo i y es interceptada por la superficie de un cuerpo j .

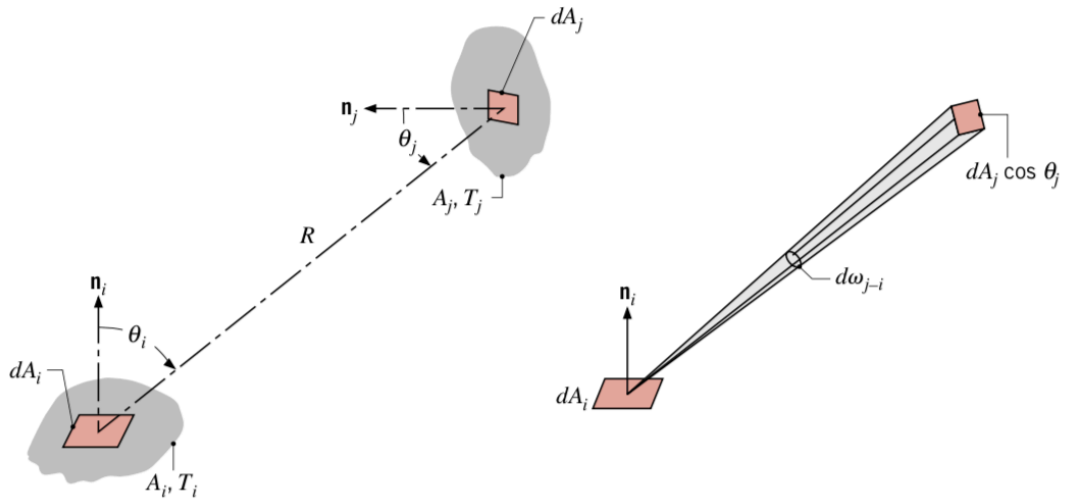


Fig. 9 Factor de visión entre dos superficies diferenciales [24]

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (5)$$

Cuando el recinto para el que se quiere calcular los factores de visión es más complejo, se recurre a un método gráfico denominado “método de las cuerdas cruzadas”. Como para el presente estudio ya existen tabulados unos factores de visión válidos para la configuración, no ha sido necesario recurrir a él.

Algebra de los factores de visión

- **Relación de reciprocidad**

La relación de reciprocidad cumple la siguiente ecuación (6).

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (6)$$

Esta expresión es útil para calcular el factor de visión de una superficie de forma rápida, si se conocen las áreas de las superficies implicadas y el factor de visión de la otra.

- **Regla de la suma**

La regla de la suma consiste en que el sumatorio de todos los factores de visión de las superficies implicadas es igual a 1.

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (7)$$

Factores de visión del modelo estudiado

Según la pared de la góndola a estudiar, se tendrán distintas configuraciones que influirán en el factor de visión a elegir.

- *Cara superior*

La cara superior no “ve” la superficie terrestre, por tanto, el factor de visión entre esta y la tierra será 0, siendo el cielo la única contribución en la potencia infrarroja absorbida.

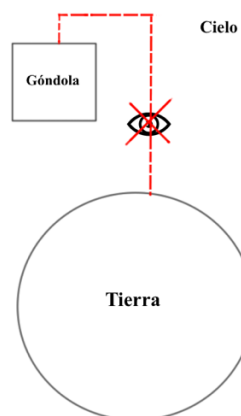


Fig. 10 Factor de visión cara superior y Tierra

- *Cara lateral*

La cara lateral sí “ve” la Tierra, por tanto, su factor de visión será distinto a 0.

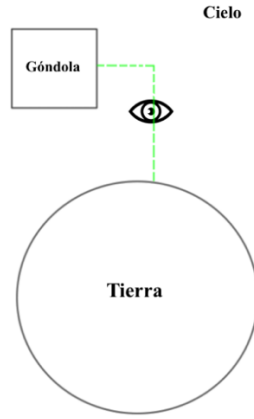


Fig. 11 Factor de visión cara lateral y Tierra

El factor de visión empleado para esta cara es el correspondiente a la ecuación (8) [25].

$$F_{be_cara_lateral} = \frac{1}{2} - \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{2} \right) \sqrt{S - 1} \quad (8)$$

Siendo S :

$$S = \frac{(R_t + H)}{R_t} \quad (9)$$

○ *Cara inferior*

La cara inferior al igual que la lateral, ve la Tierra, pero esta vez de manera perpendicular, por lo que su factor de visión variará. [25].

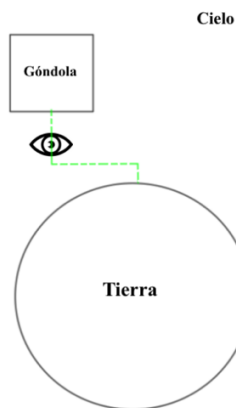


Fig. 12 Factor de visión cara inferior y Tierra

$$F_{be_cara_inferior} = \frac{1}{\left(\frac{H + R_t}{R_t}\right)^2} \quad (10)$$

Siendo H la altura y R_t el radio terrestre.

El factor de visión entre la góndola y el globo, se calcularía igual que los de la góndola con la Tierra antes presentados, pero en el estudio no se ha tenido en cuenta por no disponer de datos experimentales de la temperatura de la envoltura necesarios para el cálculo de la potencia infrarroja absorbida. La presencia de dicho factor de visión, incrementaría el valor de la potencia infrarroja absorbida.

Tras conocer los factores de visión de las tres caras, se puede obtener la potencia infrarroja absorbida por radiación.

$$\dot{Q}_{infrabs} = A\varepsilon F_{be}\sigma T_t^4 + A(1 - F_{be})\varepsilon\sigma T_{sky}^4 \quad (11)$$

El segundo sumando de la Ecuación (11) corresponde a la potencia aportada por el cielo. Haciendo uso del álgebra de factores de visión, el del cielo se calcula restandole a la unidad el factor de visión Góndola-Tierra.

3.3.2 Potencia térmica solar directa

La siguiente potencia térmica por radiación a tener en cuenta, por ser la que mayor influencia va a tener sobre la temperatura, es la solar directa absorbida, calculada mediante la Ecuación (12) [19].

Cada cara de la góndola, tendrá una radiación solar directa absorbida diferente.

En la cara superior siempre habrá una irradiación solar permanente y su cálculo se realiza mediante la ecuación (12).

$$\dot{Q}_{direct_cara_superior} = \alpha A G_s \cos(\theta_z) \quad (12)$$

La cara lateral debido a la aerodinámica y al rozamiento en el ascenso, girará, por lo que en ocasiones se darán condiciones de sombra donde la radiación solar directa absorbida será 0.

$$\dot{Q}_{direct_cara_lateral} = \alpha A G_s \cos(\beta_s) \cos(\theta_s) \quad (13)$$

El término β_s se refiere al giro de la góndola con el tiempo, es una función de la forma ωt . El sentido de giro se considera invariante durante todo el ascenso y la velocidad angular constante. Es una aproximación que se ha tomado teniendo en cuenta que no puede predecirse con exactitud como girará la misma a medida que sube.

Por su parte, la cara inferior se encuentra en sombra permanente durante todo el ascenso, por lo que no existirá radiación solar directa.

En ninguno de los casos, se está teniendo en cuenta la atenuación atmosférica ejercida por su transparencia, influenciada por las partículas presentes en la misma, aunque se puede estimar un coeficiente de un 0,9 según [23].

La potencia absorbida por radiación solar directa, dependerá como puede comprobarse en la Ecuación (12) y (13), del área, la absortancia antes definida, de los ángulos solares y de la irradiación solar.

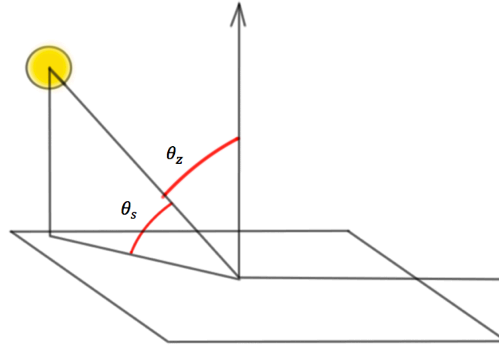


Fig. 13 Ángulo de elevación solar θ_s , y acimutal θ_z

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\delta) \sin(\varphi)) \quad (14)$$

$$\theta_s = \frac{\pi}{2} - \theta_z \quad (15)$$

Siendo δ la declinación, φ la latitud y ω la hora solar (en grados).

La declinación puede calcularse por medio de la Ecuación (16) y es el ángulo que forman la dirección de los rayos de sol y el plano del ecuador. El hemisferio norte y sur tienen signo contrario.

$$\delta = 23,45 \sin \left(\frac{360}{365} (284 + n) \right) [^\circ] \quad (16)$$

La irradiación solar $G_{S_{out}}$ medida en $\left[\frac{W}{m^2} \right]$, es la energía solar media recibida perpendicular a su dirección de propagación y situada fuera de la atmósfera a la distancia media entre la Tierra y el Sol [26].

Se denomina como constante solar y puede ser calculada como:

$$G_{S_{out}} = 1367 \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \deg \right) \right) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (17)$$

Siendo n el día del año.

El cálculo de $G_{S_{out}}$ es necesario para obtener el valor de G_s en función de la altura.

G_s es la irradiación solar que llega a la Tierra una vez atravesada la atmósfera.

La siguiente expresión, calcula la irradiación solar en función de la altura de ascenso de la góndola [19].

$$G_s = G_{S_{n.m}} + (G_{S_{out}} - G_{S_{n.m}}) \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{n.m}} \right) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (18)$$

Siendo $G_{S_{n.m}}$, la irradiación solar a nivel del mar, ρ la densidad del aire en función de H y $\rho_{n.m}$ la densidad del aire a nivel del mar.

3.3.3 Albedo

Por último, para terminar con la transferencia de calor por radiación, debe estudiarse la potencia térmica absorbida por radiación contribuida por el albedo. La Ecuación (19) es la encargada para su obtención [19].

$$\dot{Q}_{albedo} = \alpha a F_{be} G_s \sin(0,9\theta_s)^{3/2} \quad (19)$$

Se debe tener en cuenta que para la cara superior el valor de esta potencia será 0, pues su factor de visión es 0 con respecto a la Tierra.

El coeficiente de albedo α , se trata de la fracción de la radiación global incidente sobre una superficie que es reflejada. Depende del tipo de superficie en la que inciden los rayos, del ángulo

cenital del sol y menormente de las condiciones climatológicas [27]. Se tomará un valor de 0,3 basándose en los estudios de Pater y Lissauer.

3.4 Convección

El término convección describe, el intercambio de energía entre una superficie y un fluido en contacto con esa superficie, teniendo ambos, temperaturas distintas.

La transferencia de calor por convección se clasifica según la naturaleza del flujo. La convección forzada se da cuando el flujo es causado por medios externos. En la convección natural por su parte, el flujo es inducido por las fuerzas de empuje dadas por las diferencias de densidad que tienen lugar por la variación de temperatura en el fluido [24].

Independientemente de la naturaleza del proceso de transferencia de calor por convección, se cumple la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{convección} = Ah(T_{\infty} - T_s) \quad (20)$$

Siendo T_{∞} la temperatura del fluido y T_s la temperatura de la superficie.

Si T_s es mayor que T_{∞} , la transferencia de calor se hará desde la superficie al fluido.

La ecuación (20) conocida como la ley de enfriamiento de Newton, toma la siguiente forma para el presente estudio, ya que el fluido es el aire próximo a la góndola y la temperatura de la superficie a estudiar será la de las paredes de la misma.

$$\dot{Q}_{convección} = Ah(T_s - T_{amb}) \quad (21)$$

A , es el área de la superficie de la pared y h es el coeficiente de transferencia de calor, el cual depende de las condiciones de la capa límite, en las que influye la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y distintas propiedades termodinámicas correspondientes al fluido y al transporte [24].

El objetivo principal a la hora de estudiar la convección, es determinar el coeficiente de transferencia de calor de cada cara haciendo uso de correlaciones ya existentes. Estas correlaciones han sido obtenidas a partir de experimentos de laboratorio que se han desarrollado durante décadas y existirá un cierto error al aplicarlas en condiciones distintas a las que fueron diseñadas. Un ejemplo de cómo obtener dichas funciones para una placa plana, consiste en, conociendo la geometría establecida, se le aporta un flujo paralelo, mediante una resistencia eléctrica se calienta para mantener la temperatura superficial mayor que la del fluido, produciéndose así la transferencia de calor por convección de la placa al ambiente.

Conociendo T_s y T_∞ y la potencia eléctrica $E \cdot I$, que es igual a la transferencia total de calor q , y resolviendo la ley de enfriamiento de Newton, se obtiene h global.

El fluido varía sus propiedades a lo largo de la capa límite que se crea en la superficie, por lo que, para determinarlas de manera simplificada y global para las paredes de la góndola, sus propiedades se evaluarán a una temperatura media denominada temperatura de película.

$$T_{media} = \frac{T_{amb} + T_s}{2} \quad (22)$$

Los números adimensionales implicados en el cálculo de h para convección forzada en flujo externo se exponen a continuación.

- **Nº de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (23)$$

Donde μ que es la viscosidad del aire y será función de la altura [28].

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} T_{media}^{3/2}}{T_{media} + 110,4} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (24)$$

- **Nº de Prandtl**

$$Pr = 0,804 - 3,25 \times 10^{-4} T_{media} \quad (25)$$

Se trata de una función, que al igual que la viscosidad dependerá de la altura ya que T_{media} es función de la misma (Morris, 1975)

Cara lateral

Teniendo en cuenta que la velocidad y dirección del viento se desprecian en este estudio por su aleatoriedad tanto diaria como por intervalo de ascenso, y además se pretende establecer unas bases de cálculo de convección que sean válidas para experimentos en distintas zonas geográficas y condiciones atmosféricas, la única velocidad implicada en la convección será la velocidad de ascenso. Ver Fig. 14.

Se trata de convección exterior forzada, y la correlación a utilizar para el cálculo del Nu necesario para la obtención de h , es la de flujo paralelo sobre pared plana [24].

Para $Re \leq 5 \times 10^5$

$$Nu = 0,664Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad (26)$$

Para $5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7$

$$Nu = (0,037Re^{4/5} - 871)Pr^{1/3} \quad (27)$$

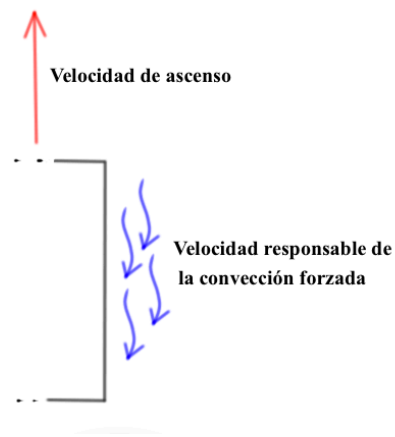


Fig. 14 Velocidades cara lateral

Cara superior

En la cara superior, la velocidad del aire incide perpendicularmente por lo que la correlación del Nu variará. Ver Fig. 15.

Son dos las posibles alternativas a utilizar, por un lado, la de velocidad perpendicular a placa vertical y por otro lado la de velocidad perpendicular a tubería cuadrada. Ver Fig. 16.

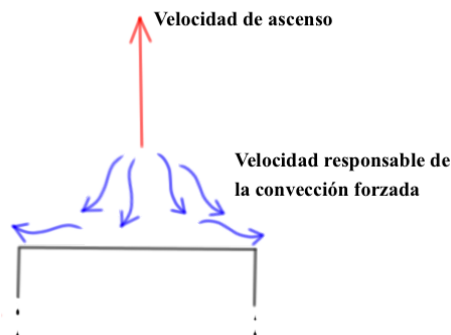


Fig. 15 Velocidades cara superior

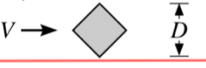
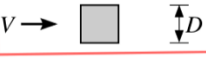



Geometry	Re_D	C	m
Square 	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.246	0.588
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.102	0.675
Hexagon 	$5 \times 10^3 - 1.95 \times 10^4$ $1.95 \times 10^4 - 10^5$	0.160 0.0385	0.638 0.782
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.153	0.638
Vertical plate 	$4 \times 10^3 - 1.5 \times 10^4$	0.228	0.731

Fig. 16 Correlaciones cara superior [24]

$$Nu = C Re^m Pr^{1/3} \quad (28)$$

Cara inferior

El cálculo del coeficiente de convección para la cara inferior es el más complejo del estudio, por el hecho de que no existe una correlación que se asemeje fácilmente a la situación de análisis.

Al igual que para la cara lateral y la cara superior, se utilizará una correlación experimental ya existente.

Teniendo en cuenta que no incide sobre esta cara un chorro de aire directo, ni paralelo, ya que está protegida por el resto de la góndola a medida que asciende, únicamente debido a la aerodinámica de la misma, se crean unos vórtices (ver Fig. 15) que intervienen en el mecanismo de convección, pero debido a que no se dispone de ninguna correlación al uso, la convección forzada queda descartada, por lo que habrá que seleccionar la configuración de convección natural que más se asemeje al caso dado, observando que la placa inferior al disipar potencia, tendrá una mayor temperatura que el ambiente, y cuando esto no suceda, se utilizará la correlación de flujo inferior sobre placa fría.

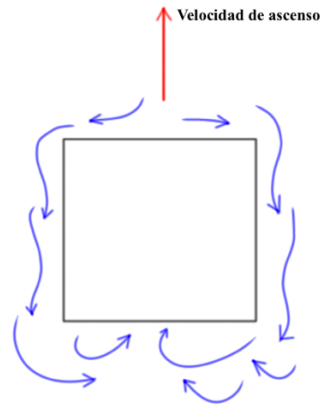


Fig. 17 Esquema simplificado del perfil aerodinámico de la góndola

Con todo el planteamiento anterior, la siguiente correlación es la elegida para el presente análisis. Fig. 17.

Flujo inferior placa caliente

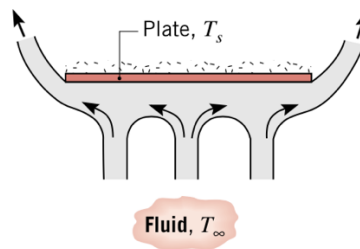


Fig. 18 Flujo inferior sobre placa caliente [17]

Para $10^5 \leq Ra \leq 10^{10}$

$$Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad (29)$$

Si durante el ascenso, la temperatura de la cara inferior es menor que la del ambiente, la correlación a utilizar será la de flujo inferior sobre placa fría, en la que el coeficiente de 0,27 de la ecuación (29), toma el valor de 0,54.

Puesto que el $Ra = GrPr$, se deberá calcular el Grashof mediante la ecuación (28).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\mu^2} \quad (30)$$

Donde g es la gravedad, β es el coeficiente de expansión volumétrico y L la longitud característica.

El número de Grashof es para la convección libre, lo que el número de Reynolds es para la convección forzada. Indica la razón de las fuerzas de empuje a las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido [24].

El coeficiente de expansión volumétrica, es una propiedad termodinámica del fluido que mide la cantidad por la cual cambia la densidad en respuesta a una variación en la temperatura con una presión constante [24].

$$\beta = \frac{1}{T_{media}} \quad (31)$$

Mientras que la longitud característica L , para las otras caras en convección forzada es la longitud del lado, en el caso de la convección libre es:

$$L = \frac{A}{Perímetro} \quad (32)$$

Una vez estudiado el Nusselt de todas las caras, el coeficiente de convección h puede ser calculado mediante la ecuación (33).

$$h = \frac{kNu}{L} \quad (33)$$

Siendo k , la conductividad térmica del aire referida a la capacidad de conducir calor [23].

$$k = \frac{2,68151 \times 10^{-3} T_{media}^{3/2}}{T_{media} + 245,4 \times 10^{-12}/T_{media}} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (34)$$

4. PROCESO ANALÍTICO

En este capítulo, se adjunta el proceso analítico llevado a cabo para la resolución del problema de forma ordenada, así como el algoritmo a seguir para su resolución en MATLAB. La diferencia con el capítulo 3, es que a continuación solo se pretende presentar la ruta seguida para obtener las distintas soluciones, sin indagar en cada ecuación como se hizo en el anterior capítulo de forma teórica.

4.1 Ecuaciones de gobierno

El objetivo es obtener la temperatura de las caras de la góndola a medida que el globo va ascendiendo.

Para ello se debe resolver la siguiente ecuación de la energía:

$$mc \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{net} + P_{dis} \quad (35)$$

El tiempo puede relacionarse con la altura mediante la Ecuación (36).

$$H = Vt \quad (36)$$

La potencia neta es la suma de la potencia neta por radiación y las pérdidas por convección.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{conv} \quad (37)$$

A su vez la potencia neta por radiación consiste en la suma de la potencia absorbida por radiación y la emitida.

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{abs} + \dot{Q}_{emitida} \quad (38)$$

La potencia emitida por radiación, dependerá de la temperatura en cada instante de la cara de la góndola estudiada.

$$\dot{Q}_{emitida} = A\epsilon\sigma T^4 \quad (39)$$

La potencia absorbida por radiación tiene dos componentes, por un lado, la radiación infrarroja absorbida dependiente de los factores de visión y la potencia solar absorbida.

$$\dot{Q}_{infrabs} = A\varepsilon F_{be}\sigma T_t^4 + A(1 - F_{be}\varepsilon\sigma T_{sky}^4) \quad (40)$$

En la potencia absorbida por radiación infrarroja se tiene en cuenta tanto la absorbida de la Tierra como la absorbida del cielo.

Según la cara de la góndola que se esté estudiando, el factor de visión tomará valores distintos para cada caso.

Cara superior

En este caso, la potencia infrarroja absorbida tendrá únicamente la contribución del cielo por estar a una determinada temperatura.

Cara lateral

$$F_{be_cara_lateral} = \frac{1}{2} - \left(\frac{2}{\pi}\sqrt{2}\right)\sqrt{S-1} \quad (41)$$

Siendo S:

$$S = \frac{(R_t + H)}{R_t} \quad (42)$$

Cara inferior

$$F_{be_cara_inferior} = \frac{1}{\left(\frac{H + R_t}{R_t}\right)^2} \quad (43)$$

La temperatura del cielo se calcula con la ecuación (44).

$$T_{sky} = T_{sky.n.m} \exp \left[\ln \left(\frac{T_{sky50Km}}{T_{sky.n.m}} \right) \frac{H}{50} \right] \quad (44)$$

Donde la altura H debe ser introducida en Km.

La potencia solar absorbida tiene dos contribuciones, por un lado, la radiación solar directa y por otro lado, la proveniente del albedo.

$$\dot{Q}_{albedo} = \alpha a A F_{be} G_s \sin(0,9\theta_s)^{3/2} \quad (45)$$

El valor de la ecuación (45) será 0, cuando se estudie la cara superior, ya que como se ha visto anteriormente su factor de visión es 0 por no “ver” la Tierra.

La radiación solar directa por su parte dependerá de la cara que se estudie.

Cara superior

$$\dot{Q}_{direct_cara_superior} = \alpha A G_s \cos(\theta_z) \quad (46)$$

Cara lateral

$$\dot{Q}_{direct_cara_lateral} = \alpha A G_s \cos(\beta_s) \cos(\theta_s) \quad (47)$$

Para valores de β_s ($0 \leq \cos(\beta_s) \leq 1$)

Para valores de β_s $-1 \leq \cos(\beta_s) \leq 0$, $\dot{Q}_{direct_cara_lateral} = 0$.

Cara inferior

En la cara inferior no incide la radiación solar directa por lo que $\dot{Q}_{direct_cara_inferior} = 0$.

Para poder obtener las potencias anteriores comprendidas entre las Ecuaciones (45) y (47) se debe conocer el valor de la irradiación solar en cada instante, para ello se utiliza la expresión (48).

$$G_s = G_{s.n.m} + (G_{s.out} - G_{s.n.m}) \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{n.m}}\right) \quad (48)$$

Donde la densidad del aire depende de la altura según los siguientes tramos:

Si $H < 11 \text{ Km}$

$$\rho = 1,1225 \left(\frac{288,15 - 6,5H}{288,15} \right)^{4,2558} \quad (49)$$

Si $11 \leq H < 20 \text{ Km}$

$$\rho = 0,364e^{-\frac{H-11}{6,34162}} \quad (50)$$

Si $H \geq 20 \text{ Km}$

$$\rho = 0,088 \left(\frac{216,65 + (H - 20)}{216,65} \right)^{-35,1632} \quad (51)$$

Una vez estudiadas la potencia neta por radiación, para obtener las pérdidas por convección se deberá seguir el proceso descrito a continuación.

Las pérdidas de calor por convección se calculan por medio de la Ecuación (52).

$$\dot{Q}_{convección} = -Ah(T - T_{amb}) \quad (52)$$

Se debe determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor.

$$h = \frac{kNu}{L} \quad (53)$$

Para la resolución de la ecuación (53), será necesario calcular los siguientes parámetros.

Los dependientes de la temperatura se calcularán a la temperatura media.

Temperatura media:

$$T_{media} = \frac{T_{amb} + T_s}{2} \quad (54)$$

Donde la temperatura ambiente, depende de la altura y puede ser calculada como:

Si $H < 11 \text{ Km}$

$$T_{amb} = 288,15 - 6,5H \quad (55)$$

Si $11 \leq H < 20 \text{ Km}$

$$T_{amb} = 216,65 \quad (56)$$

Si $H \geq 20 \text{ Km}$

$$T_{amb} = 216,65 + (H - 20) \quad (57)$$

Conductividad térmica del aire:

$$k = \frac{2,68151 \times 10^{-3} T_{media}^{3/2}}{T_{media} + 245,4 \times 10^{-12}/T_{media}} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (58)$$

Viscosidad del aire:

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} T_{media}^{3/2}}{T_{media} + 110,4} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (59)$$

Nº de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (60)$$

La longitud característica L dependerá de la cara de estudio.

Nº de Prandtl

$$Pr = 0,804 - 3,25 \times 10^{-4} T_{media} \quad (61)$$

El último término necesario para poder calcular el coeficiente de transferencia de calor, es el nº de Nusselt, que variará según la cara a estudiar.

Cara superior

La longitud característica L , toma el valor de la longitud del lado.

Para $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^5$

$$Nu = 0,102Re^{0,675}Pr^{1/3} \quad (62)$$

Cara lateral

La longitud característica L , toma el valor de la longitud del lado.

Para $Re \leq 5 \times 10^5$

$$Nu = 0,664Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad (63)$$

Para $5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7$

$$Nu = (0,037Re^{4/5} - 871)Pr^{1/3} \quad (64)$$

Cara inferior

La longitud característica L , se calcula mediante la ecuación (65).

$$L = \frac{A}{\text{Perímetro}} \quad (65)$$

Para $10^5 \leq Ra \leq 10^{10}$

$$Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad (66)$$

El Grashof se obtiene por medio de la ecuación (67).

$$Gr = \frac{g\beta(T - T_{amb})L^3}{\mu^2} \quad (67)$$

Y por último, el Ra :

$$Ra = GrPr \quad (68)$$

4.2 Algoritmo de resolución

A continuación, se presenta el esquema simplificado del método llevado a cabo para la resolución del problema en MATLAB.

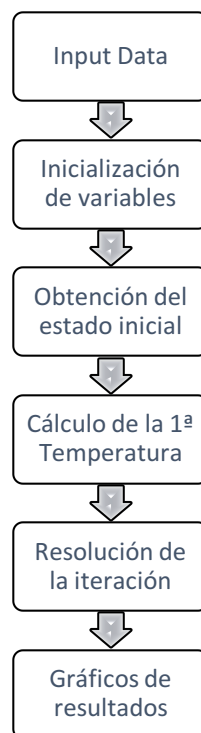


Fig. 19 Algoritmo de resolución

- **Input Data**

Se introducen las constantes cuyos valores son conocidos desde el estado inicial.

- **Inicialización de variables**

Se crea un vector de longitud igual al número de iteraciones, con el fin de ir almacenando valores a medida que se avanza en el bucle.

- **Obtención del estado inicial**

A partir de los datos introducidos, se calcula el valor de las distintas variables en el estado inicial.

- **Cálculo de la 1ª temperatura**

Con los valores obtenidos del estado inicial, se obtiene la primera temperatura de la cara de la góndola.

- **Resolución de la iteración**

Con todos los valores del estado inicial calculados, se entra en el bucle cuyo número de iteraciones será desde el primer metro hasta la altura final con un paso de 1 metro.

Haciendo uso del estado inmediatamente anterior, se calcula el siguiente estado, resolviéndolo así mediante un método incremental. Teniendo en cuenta que los cálculos de la temperatura se hacen metro a metro, el error que pueda darse por el uso del estado anterior para calcular la temperatura del siguiente, es muy pequeño, debido a la escasa variación que esta sufre durante el incremento de un metro en la altura.

- **Gráficos de resultados**

Una vez calculadas todas las temperaturas en función de la altura, se gráfica las soluciones requeridas mediante el comando *plot*.

4.3 Condiciones iniciales y de contorno

En este epígrafe se adjuntan los valores iniciales del problema necesarios para inicializar su resolución.

TABLA 3 CONSTANTES UTILIZADAS

Variable	Valor	Unidades
A	0,2	m
ε	0,8	-
σ	$5,67 \times 10^{-8}$	$\frac{W}{m^2 K^4}$
T_e	260	K
R_t	6371	Km
$T_{sky.n.m}$	239,5	K
$T_{sky50Km}$	3	K
$G_{s.n.m}$	700	$\frac{W}{m^2}$
$G_{s.out}$	1360	$\frac{W}{m^2}$

Variables	Valor	Unidades
$\rho_{n.m}$	1,1225	$\frac{Kg}{m^3}$
θ_s	25	$^{\circ}$
a	0,3	-
α	0,2	-
V	2,7	$\frac{m}{s}$
P_{dis}	20	W
m	2	Kg
c	900	$\frac{J}{KgK}$
T (0)	20	K

La velocidad de ascenso es considerada constante durante todo el recorrido, esta variará en función del rango horario de lanzamiento (día y noche) Fig. 21. Queda demostrado en el estudio llevado a cabo por Sherif Saleh y Weiliang He, “Ascending performance analysis for high altitude zero pressure balloon” [28]. En la Fig. 20, puede verse una pendiente aproximadamente constante lo que implica mínima variación en la velocidad de ascenso.

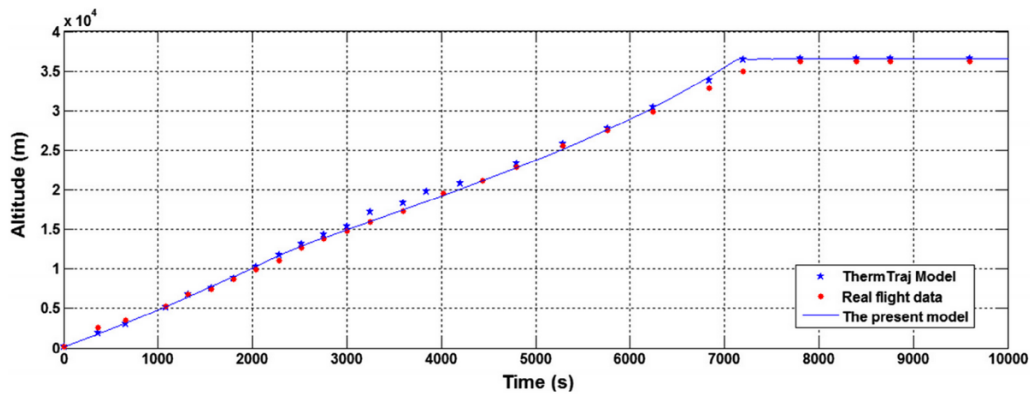


Fig. 20 Grafico que demuestra la velocidad de ascenso constante [28]

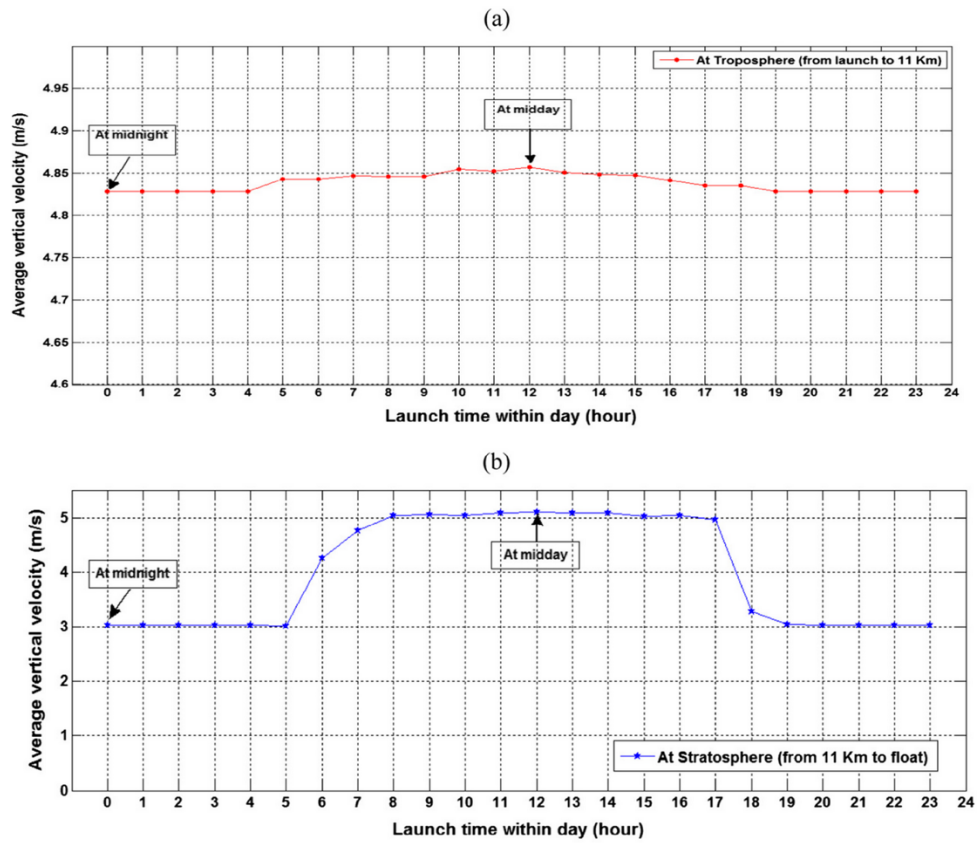


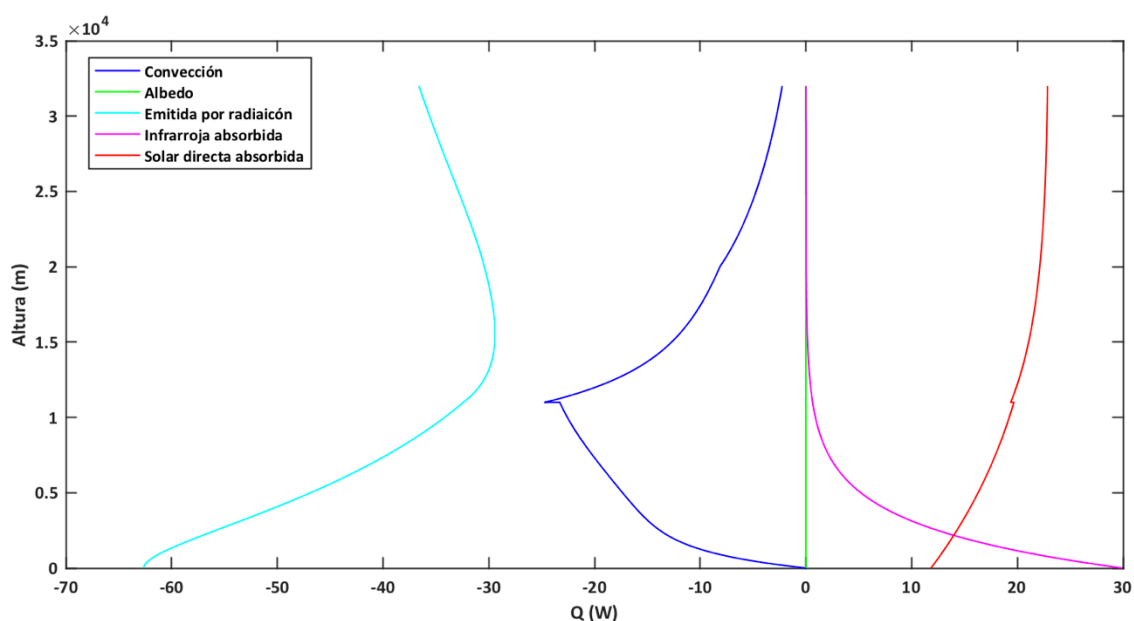
Fig. 21 Variación de velocidad de ascenso según hora de lanzamiento y rango de altura [28]

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez presentado el proceso analítico llevado a cabo para la resolución del balance de energía en las distintas caras, dando como resultado la temperatura en cada una de ellas, en el presente capítulo se adjuntan las gráficas obtenidas tras la resolución del código Matlab, a fin de describir los efectos que tienen ciertas variables sobre la temperatura, haciendo así un barrido paramétrico de las tres caras estudiadas.

Análisis de las potencias térmicas

En las siguientes gráficas (Fig. 22 a Fig. 24), se puede observar las potencias que intervienen en el balance de energía según la cara de la góndola. Se describirá el comportamiento de las distintas potencias en cada superficie en función de la altura.



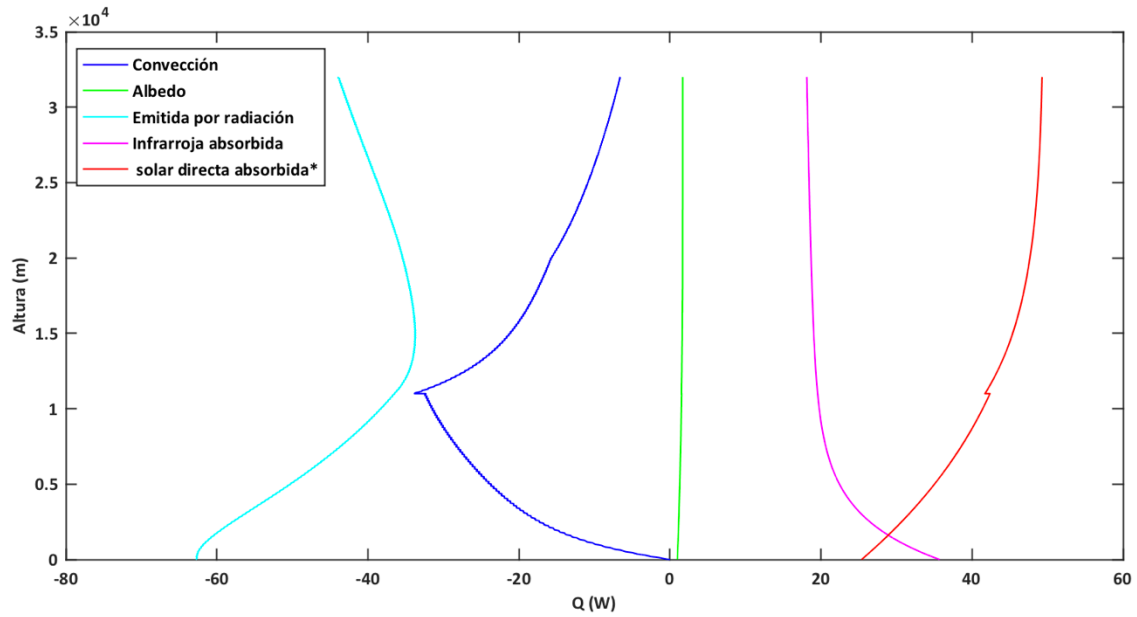


Fig. 23 Potencias térmicas cara lateral

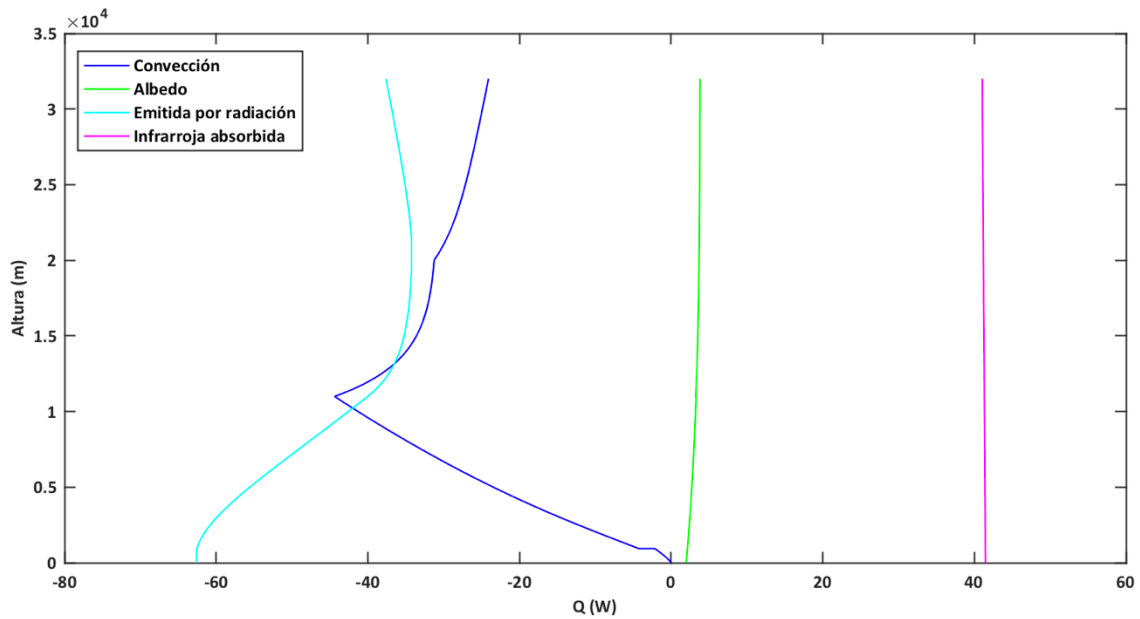


Fig. 24 Potencias térmicas cara inferior

- **Convección**

Las pérdidas por convección alcanzan su valor máximo negativo a una altura próxima a los 11 Km (Ver Fig. 22 a la Fig. 24). Es un punto de inflexión donde se aprecia un fuerte cambio en el comportamiento de esta potencia térmica, debido a la variación del perfil de temperatura de la atmósfera a partir de esta altitud (Ver Fig. 25). La tendencia a 0 W a partir de los 11 Km, es debido a que la diferencia de temperatura de las superficies con el ambiente va disminuyendo a medida que se va alcanzando la estratosfera.

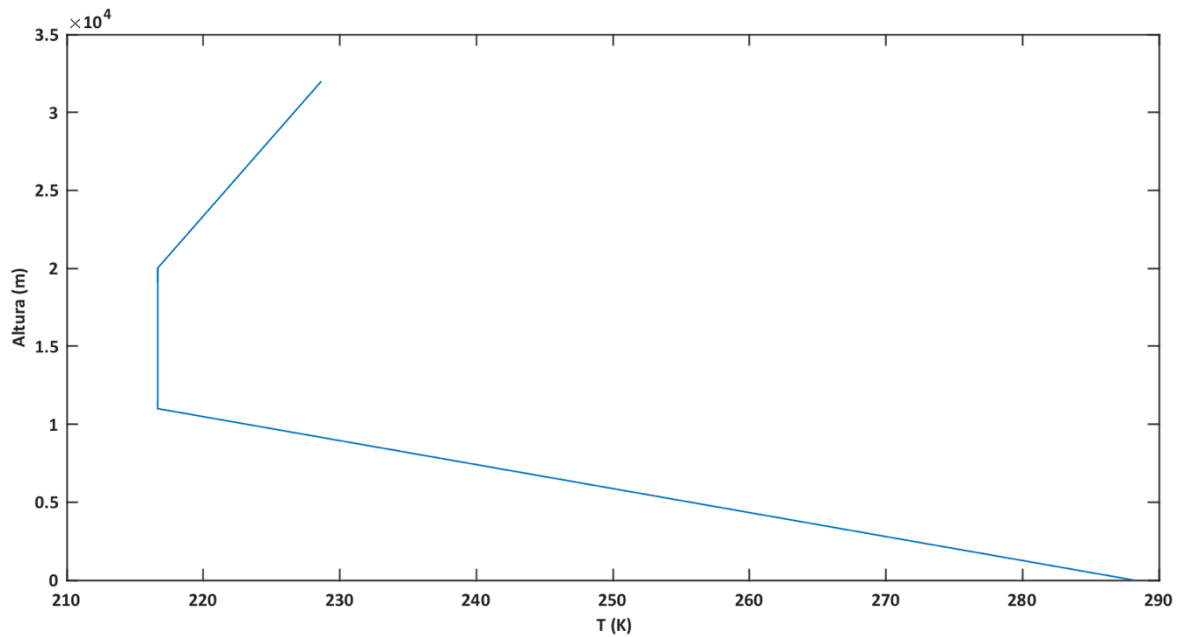


Fig. 25 Temperatura ambiente en función de la altura

- **Potencia emitida por radiación**

Para la mayor parte del recorrido, la potencia emitida por radiación es la que más influencia tiene sobre la disminución de la temperatura en cada superficie. Los primeros kilómetros de recorrido supondrán pérdidas de calor elevadas, ya que las temperaturas de las superficies son mayores que para el resto de alturas. Alrededor de los 11 Km toma sus valores más bajos, y se vuelven a aumentar las pérdidas mientras asciende, debido al incremento de la temperatura (ver Fig. 22 a Fig. 24).

- **Albedo**

La potencia absorbida por la influencia del albedo en la cara superior es nula por no existir factor de visión con la Tierra (Ver Fig. 22 línea verde), mientras que en las dos caras restantes es próxima a 0 W, por lo que tendrá poco efecto sobre la variación de la temperatura.

- **Potencia Infrarroja absorbida**

En la cara superior (Ver Fig. 22 línea rosa), la potencia infrarroja absorbida a medida que aumenta la altura tiende a 0. Al no existir factor de visión entre esta cara y la Tierra, la temperatura del cielo es la única que contribuye en la potencia infrarroja absorbida. La temperatura del cielo disminuye bruscamente con la altura, por lo que sus valores bajos (Ver Fig. 26), hacen que también lo sean los de la potencia infrarroja absorbida.

La cara lateral y la inferior, tienen un factor de visión distinto a 0, por “ver” la Tierra. Por tanto, para ambas caras, tanto la temperatura del cielo como la temperatura terrestre, influirán en la potencia infrarroja absorbida, haciendo que esta, no tienda a 0 a medida que aumente la altura (Ver Fig. 23 y Fig. 24). La cara inferior es la que mayor potencia infrarroja recibe, porque su factor de visión con la Tierra, es mayor que el de la cara lateral.

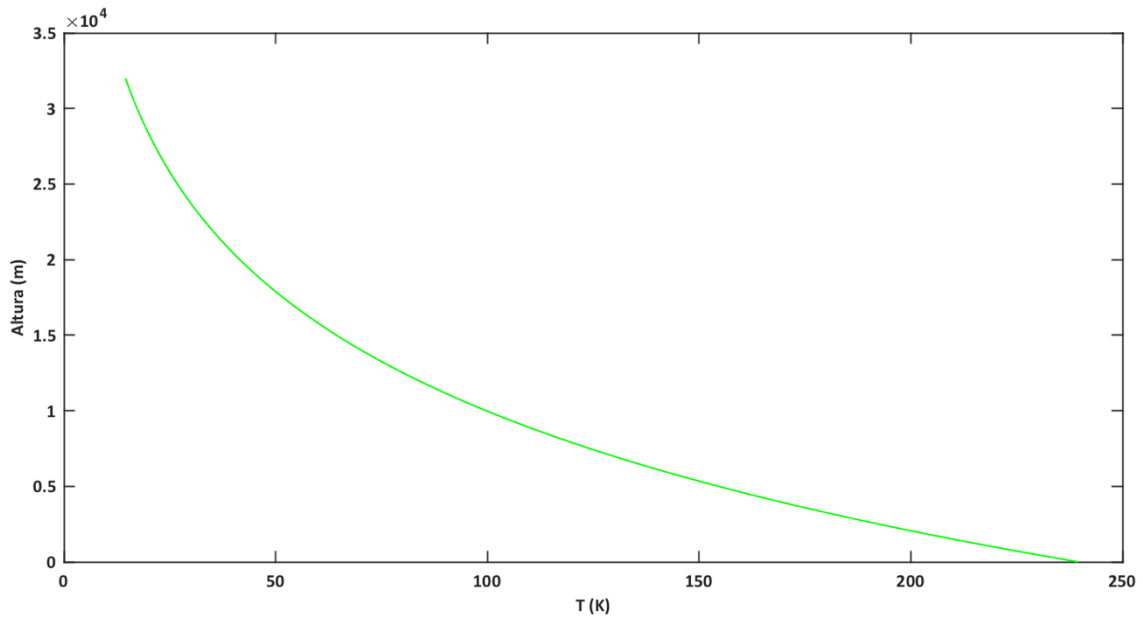


Fig. 26 Temperatura del cielo en función de la altura

- **Radiación solar directa**

Como se verá después, la diferencia de la radiación solar absorbida por cada cara dependerá de la altura solar. La cara lateral, al girar, no siempre absorberá radiación solar directa, en la Fig. 23, la línea roja corresponde a la radiación solar directa que absorbería esta superficie si la góndola no rotase. La superficie inferior al estar en sombra permanente, no recibirá radiación solar directa.

Influencia de la emisividad

Las gráficas presentadas en la Fig. 27 a la Fig. 29, tienen como objetivo mostrar la diferencia de temperaturas que existe para distintas emisividades asociadas a altas longitudes de onda.

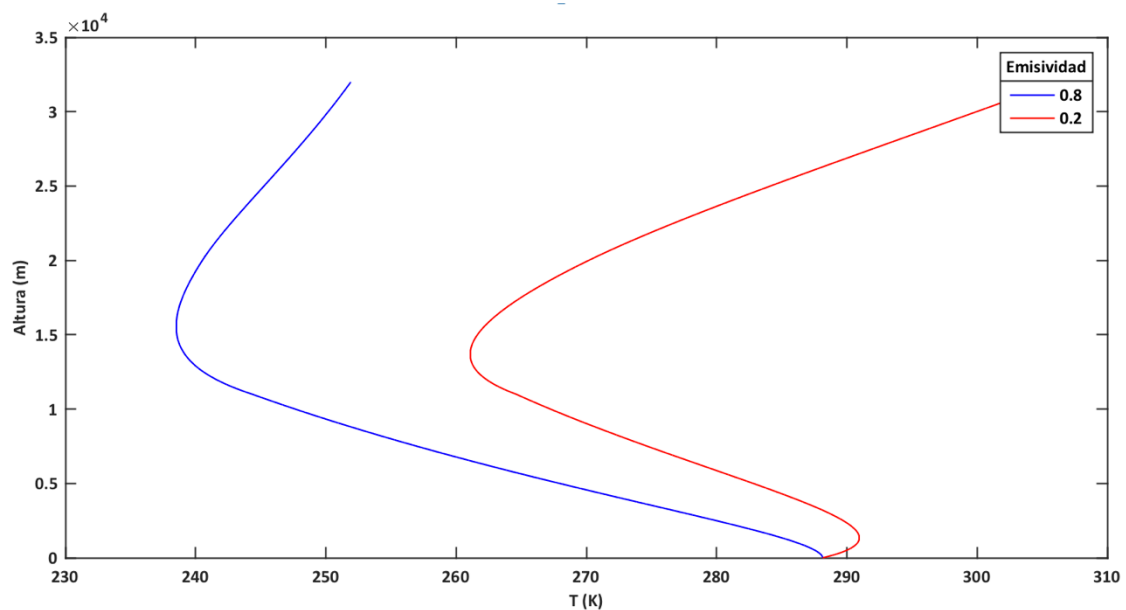


Fig. 27 Influencia de la emisividad en la cara superior

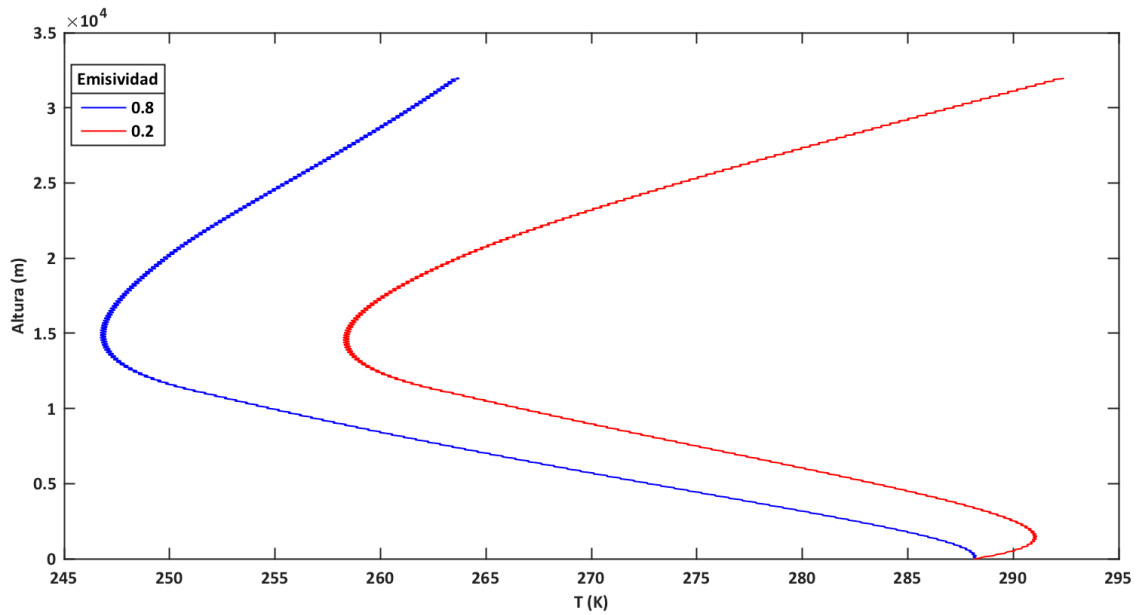


Fig. 28 Influencia de la emisividad en la cara lateral

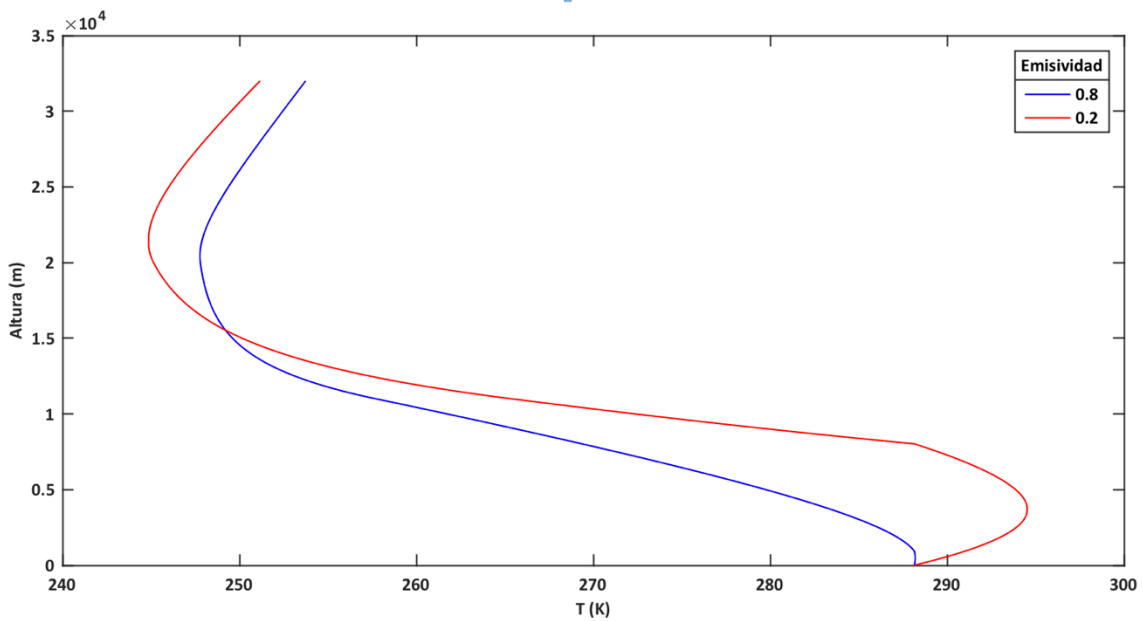


Fig. 29 Influencia de la emisividad en la cara inferior

La emisividad definida en el capítulo 3, depende entre otros, del material, estado superficial y longitud de onda. En el balance de energía, interviene en la potencia emitida por radiación, y al considerarse cuerpos grises a las tres superficies, también intervendrá en la potencia infrarroja absorbida. Para los cálculos iniciales se consideró una emisividad de 0,8 (línea azul de las Fig. 27 a Fig. 29). Un valor de 0,2 (línea roja) supone aumentar la temperatura en las tres caras. El motivo es que las pérdidas por radiación anteriormente descritas, disminuyen al disminuir la emisividad. La cara inferior a partir de los 15 Km, presenta un comportamiento distinto al de las otras dos superficies, como se ha visto en la Fig. 24, la potencia infrarroja absorbida en esta cara, toma valores cercanos a los 40 W, por lo que valores de emisividad menores hacen que decrezca esta potencia y con ella la temperatura.

Influencia de la absorptancia

La fracción entre la radiación solar absorbida y la total que incide sobre una superficie, está presente tanto en la radiación solar directa como en el albedo (bajas longitudes de onda).

Un valor de 0,2, ha sido con el que los cálculos se iniciaron y se comparará con un valor de 0,5.

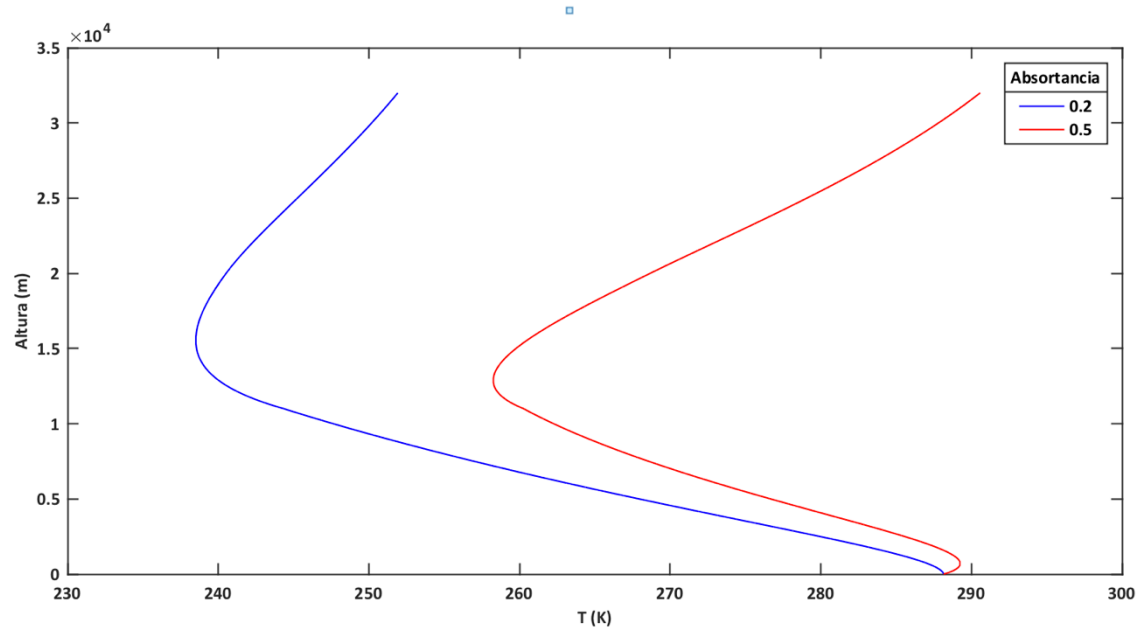


Fig. 30 Influencia de la absorptancia en la cara superior

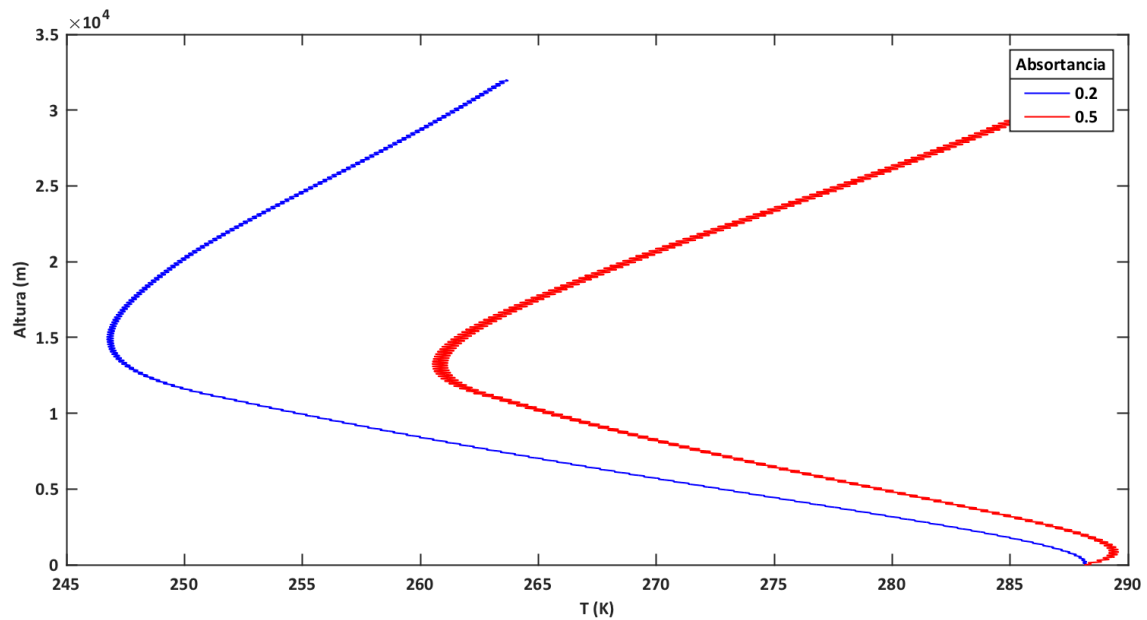


Fig. 31 Influencia de la absorptancia en la cara lateral

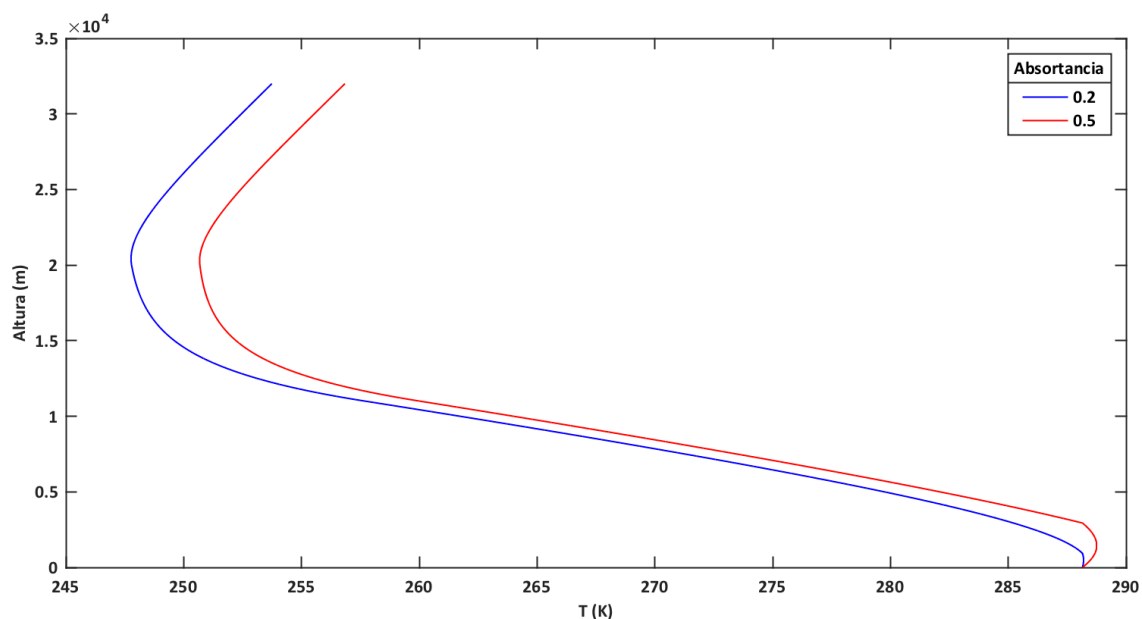


Fig. 32 Influencia de la absorptancia en la cara inferior

Como se aprecia en la Fig. 30 a la Fig. 32, mayores absorptancias suponen mayores temperaturas en las tres caras, debido a que la potencia absorbida por el albedo aumenta, pero principalmente lo hace la radiación solar directa. La cara inferior, al no recibir radiación solar directa experimentará un menor cambio en su temperatura con respecto al de las otras superficies.

Influencia de la velocidad de ascenso

En las tres próximas imágenes, de la Fig. 33 a la Fig. 35, se representa la variación de la temperatura con la velocidad de ascenso.

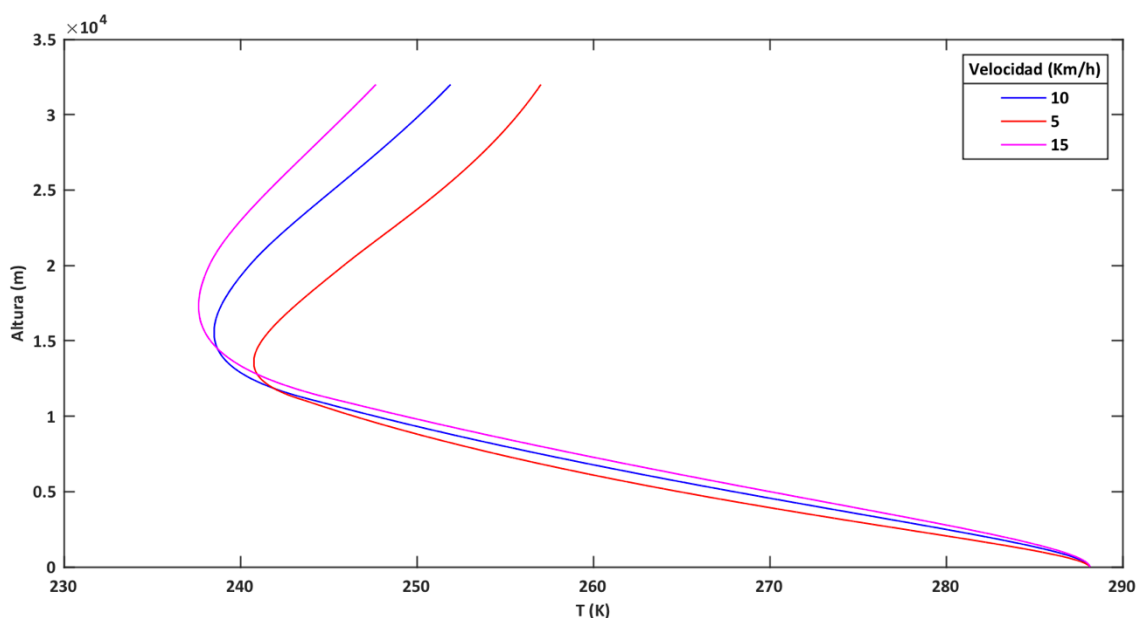


Fig. 33 Influencia de la velocidad en la cara superior

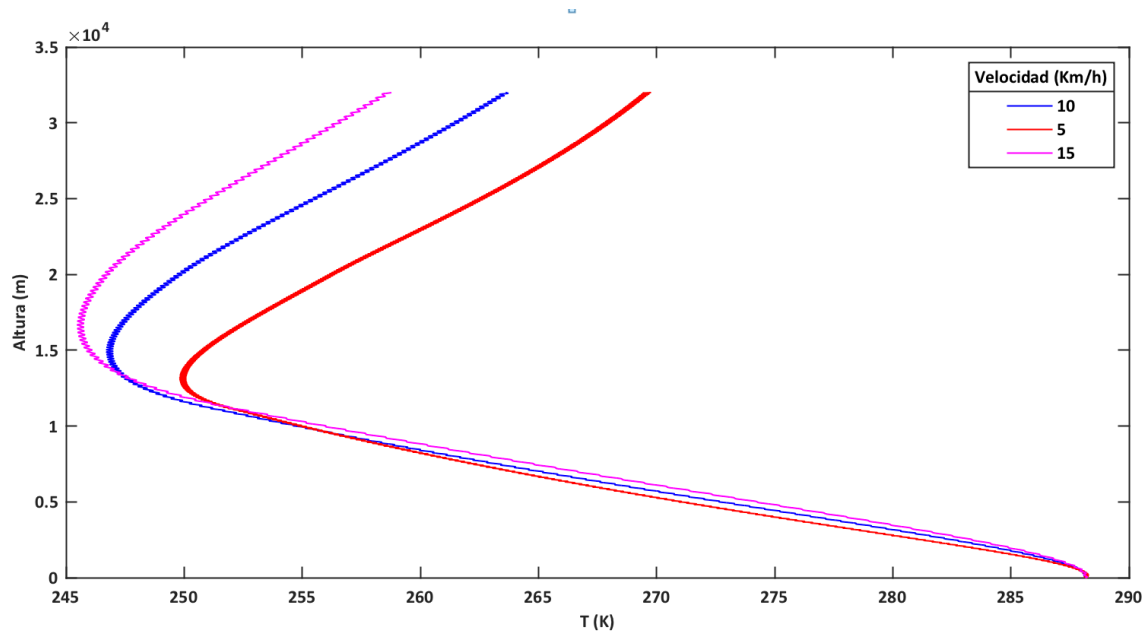


Fig. 34 Influencia de la velocidad en la cara lateral

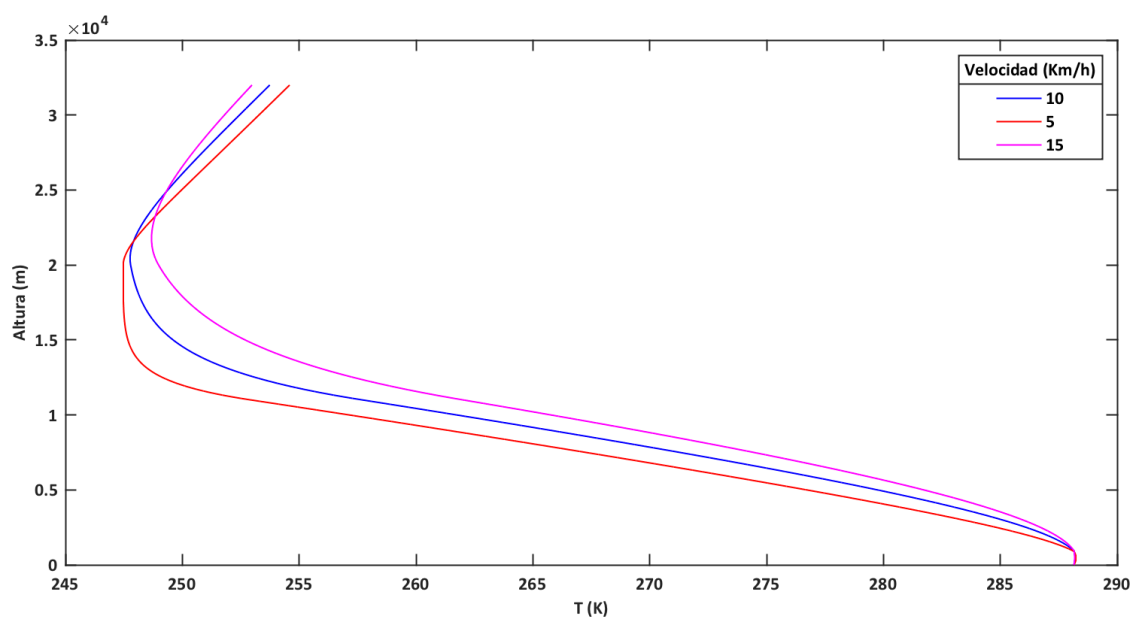
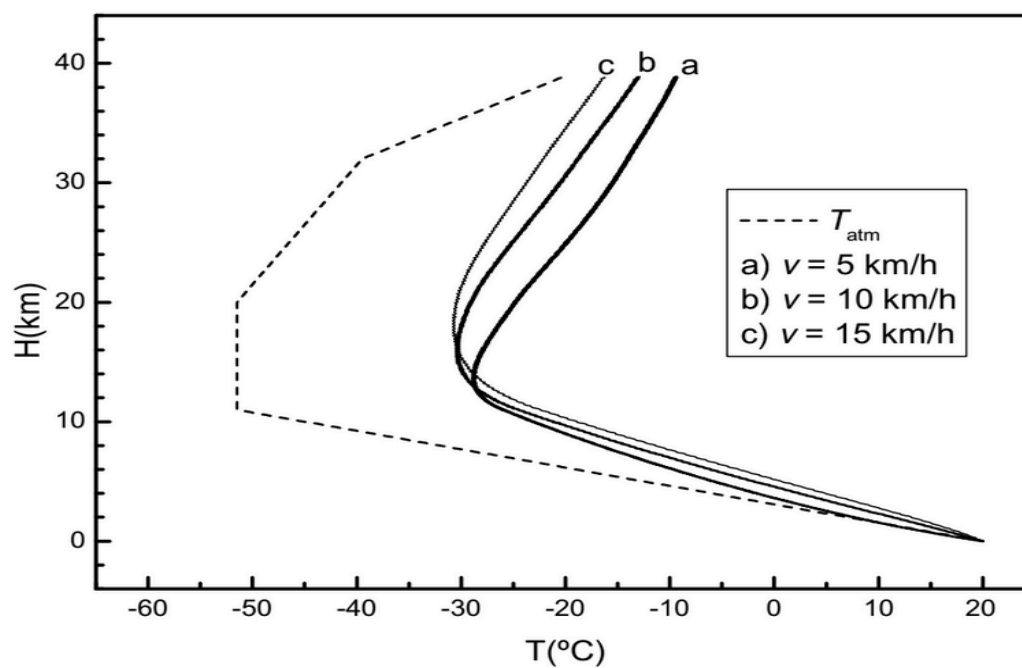


Fig. 35 Influencia de la velocidad en la cara inferior

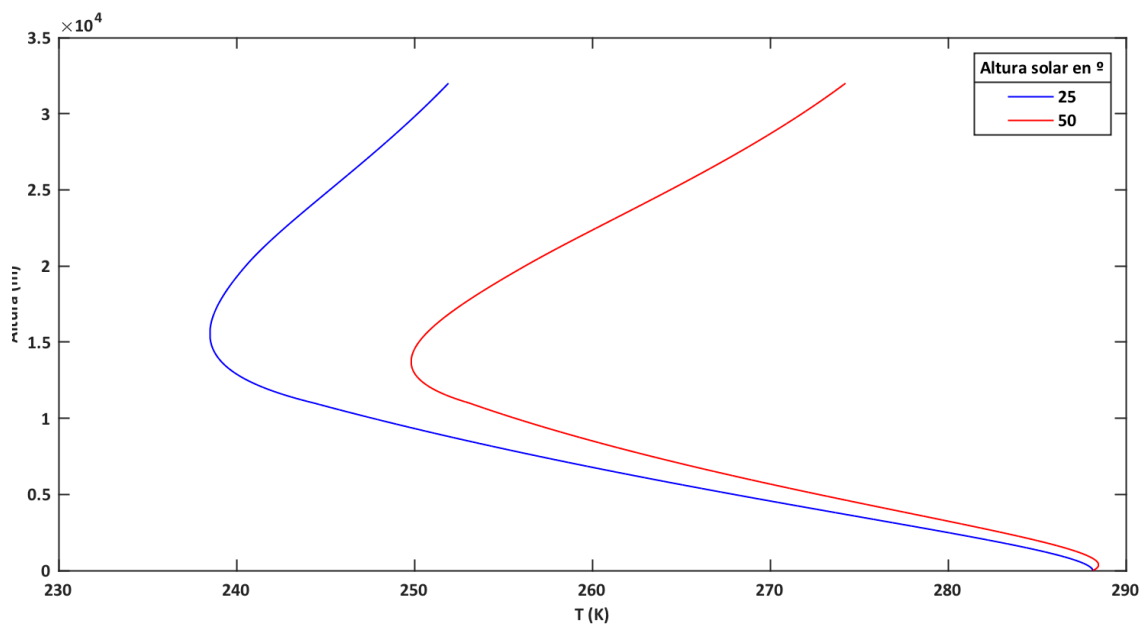
En los perfiles de temperatura mostrados en función de la velocidad (Fig. 33 a Fig. 35) se encuentran dos efectos opuestos. Por un lado, cuanto mayor es la velocidad de ascenso, mayor será el efecto de enfriamiento del aire y para una determinada altura se alcanzarán temperaturas menores. Por otro lado, si la velocidad de ascenso es menor, el sistema está más próximo a encontrar el equilibrio térmico con el aire.

La Fig.36 corresponde a la gráfica obtenida por I. Pérez Grande, puede comprobarse las similitudes con la gráfica adjuntada en la Fig. 34.



Influencia del ángulo solar

Por simplicidad, el ángulo solar se ha considerado constante durante el ascenso basándose en [19]. La variación de la temperatura con la altura solar se muestra en la Fig. 37 a la Fig. 39.



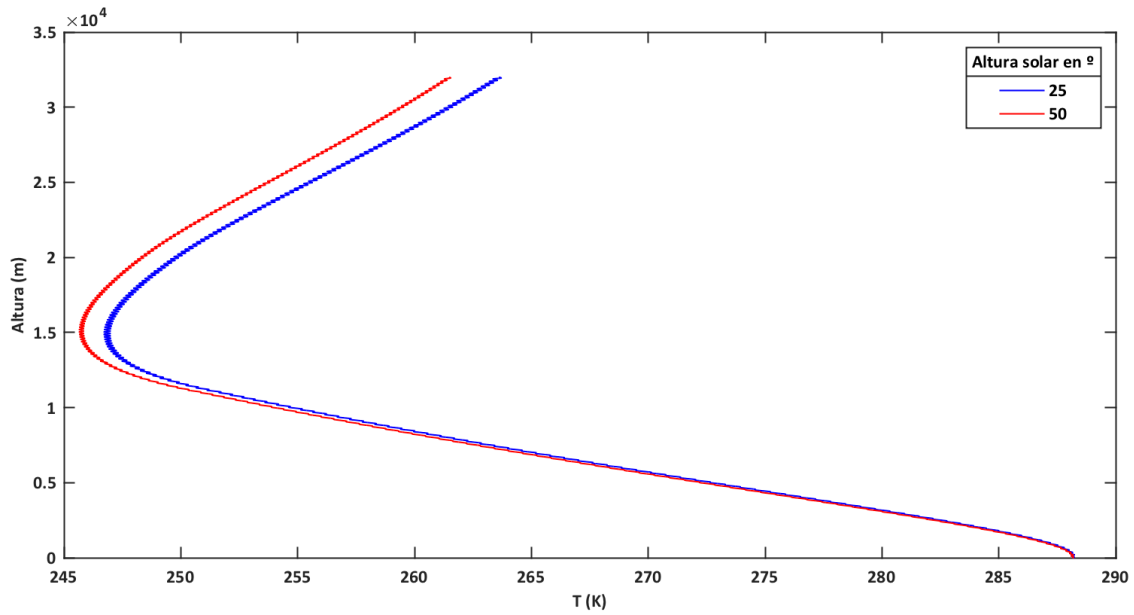


Fig. 38 Influencia de la altura solar en la cara lateral

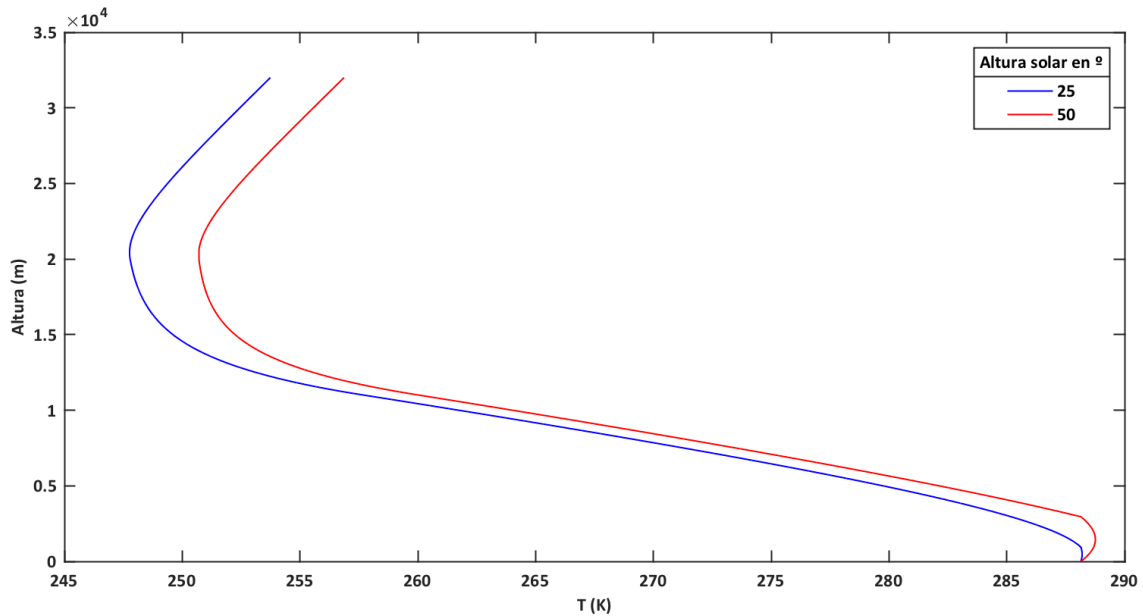


Fig. 39 Influencia de la altura solar en la cara inferior

La cara superior es la que mayores cambios experimenta en términos de temperatura (Fig. 37). La radiación solar directa absorbida por esta superficie depende del seno del ángulo correspondiente a la altura solar. Un aumento de este ángulo de 25° a 50°, supone un aumento del seno del mismo, y con ello un aumento de la radiación solar directa absorbida, dando lugar a mayores temperaturas.

La rotación durante el ascenso de la cara lateral, al darse tramos en los que esta experimenta condiciones de sombra, el aumento de la altura solar no afecta notablemente sobre la variación de la temperatura. La radiación solar directa absorbida por esta superficie está condicionada por el coseno del ángulo solar, motivo por el cual se aprecia un leve descenso de las temperaturas en esta superficie (Fig.38).

La cara inferior presenta sombra permanente, pero el aumento de la potencia absorbida por albedo, incrementa unos pocos grados su temperatura (Fig.39).

Un lanzamiento en horario nocturno, donde la radiación solar directa es 0 W y no hay potencia absorbida por albedo, supondrá un descenso de las temperaturas en las tres caras estudiadas (Ver Fig.40 a la 42).

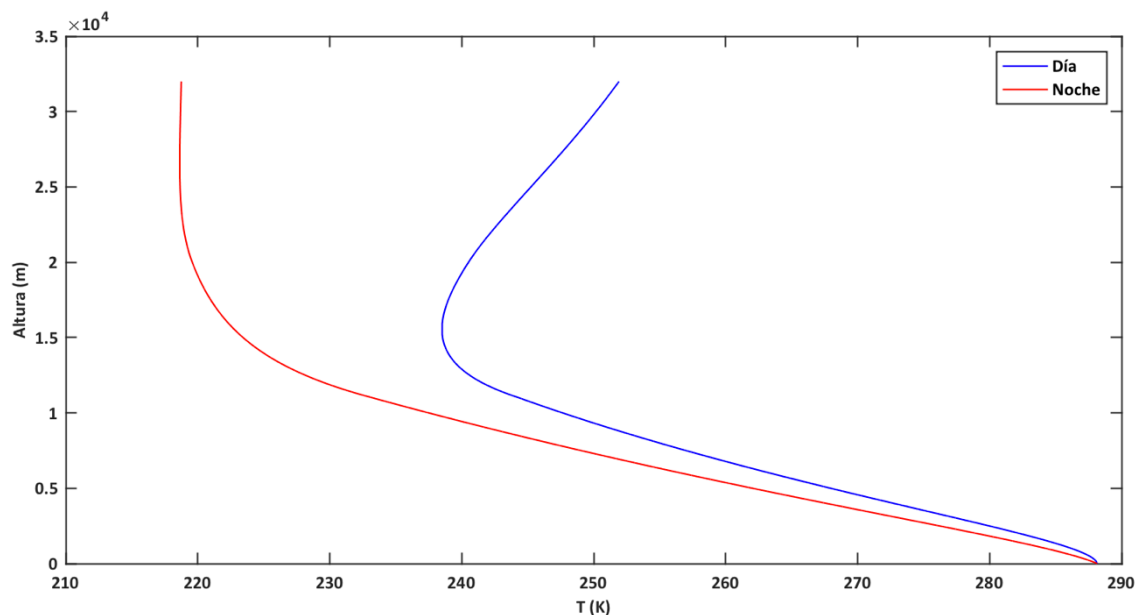


Fig. 40 Temperatura cara superior día y noche

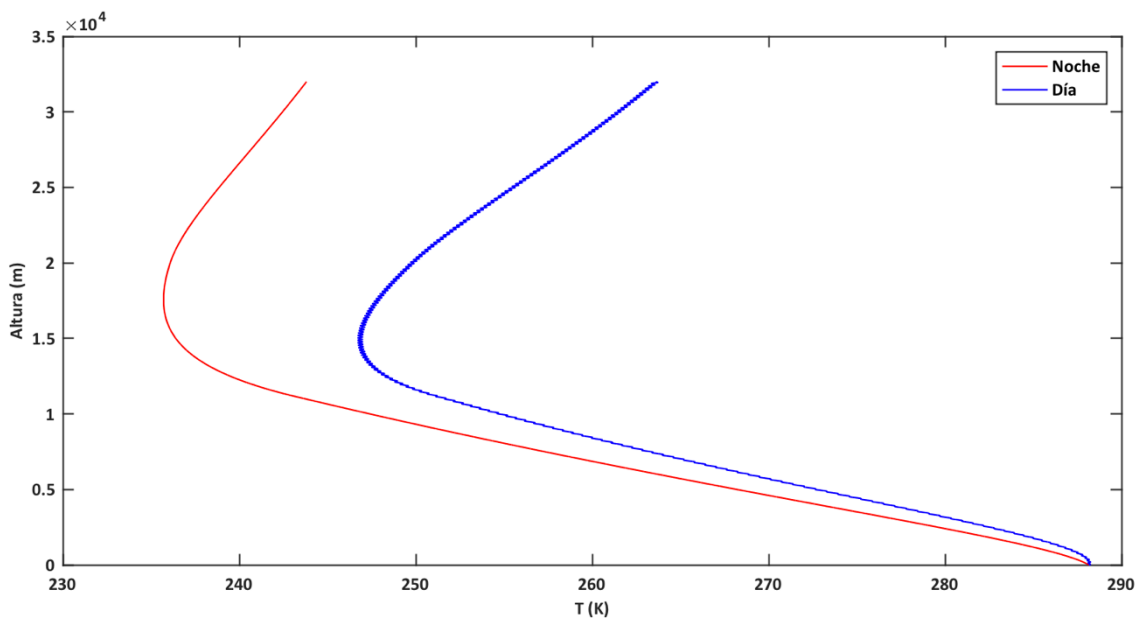


Fig. 41 Temperatura cara lateral día y noche

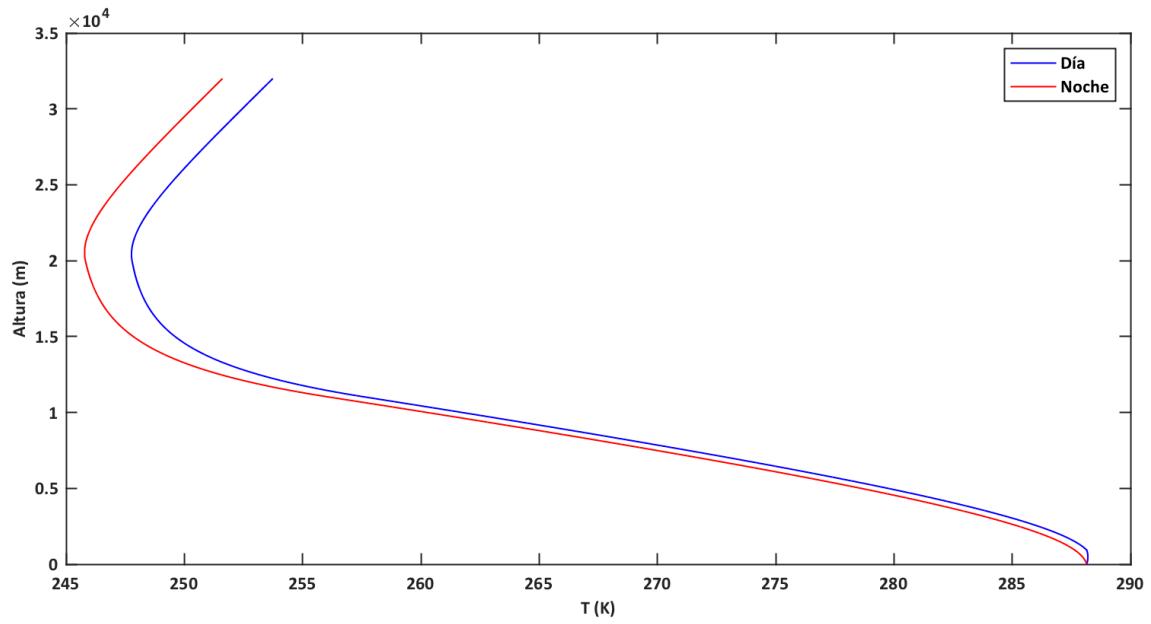


Fig. 42 Temperatura cara inferior día y noche

Las mayores diferencias de temperatura, entre un lanzamiento nocturno y diurno se dan en la cara superior y lateral (Fig. 40 y Fig.41), ya que es en estas, donde la radiación solar directa absorbida tiene mayor influencia. La temperatura de la superficie inferior no experimenta un marcado descenso de las temperaturas. Por el día está en sombra permanente, por lo que no absorbe radiación solar directa como ya se ha mencionado, y la contribución del albedo no es tan significativa como la de las otras potencias térmicas.

6. MARCO REGULADOR Y ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

6.1 Marco regulador

En el desarrollo de misiones en las cuales el uso de globos científicos esté presente, se deben tomar una serie de precauciones y seguir una normativa para garantizar la seguridad no solo de los integrantes implicados en la consecución de las mismas, sino también para los individuos que puedan verse afectados en cualquiera de las fases de vuelo.

La legislación, regularizaciones y normativas correspondientes al uso de estas aeronaves con fin intelectual o científico, no dispone información detallada al respecto y depende del país en el que se realice el lanzamiento y la zona aérea afectada por el vuelo, pudiendo otros países intervenir por sobrepasar fronteras.

A continuación, se revisará el marco regulador que afecte a esta clase de experimentos en el territorio español, donde deberán cumplimentarse los requisitos impuestos por AESA (Agencia Estatal De Seguridad Aérea), además de incluir las distintas áreas de vuelo según AIP-España.

❖ Obtención de autorización

Antes de proceder al lanzamiento de un globo HAB, se deberá rellenar un formulario expedido por AESA, institución que valorará si el lanzamiento cumple los requisitos y dará luz verde en caso afirmativo.

❖ Zonas aéreas según AIP-España [29]

En el documento aportado por AIP-España, *“Zonas prohibidas, restringidas y peligrosas; zonas temporalmente segregadas”*, se clasifica el espacio aéreo según la siguiente terminología, de la cual, no se incluirá sus definiciones, pues se dispone de libre acceso a las mismas en el documento citado al principio del párrafo.

- Zona prohibida (P)
- Zona restringida (R)
- Zona peligrosa (D)
- Zonas D y R manejables
- Áreas temporalmente segregadas

De la Fig. 43 a la Fig. 46, puede verse con más detalle las etiquetas de estas zonas, mientras que en la Fig. 47 se adjunta un mapa esquemático de España con las limitaciones contorneadas.

ZONAS PROHIBIDAS / PROHIBITED AREAS		
IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE - Límites laterales IDENTIFICATION AND NAME - Lateral limits	Límite superior Upper limit Límite inferior Lower limit	Observaciones / Remarks (Hora de actividad, tipo de restricción, naturaleza del riesgo, riesgo de interceptación) (Time of activity, type of restriction, nature of hazard, risk of interception)
GMP21 355647N 0052900W; 355246N 0053436W; 355054N 0053232W; 355456N 0052703W; 355647N 0052900W	<u>FL 240</u> SFC	Prohibido el sobrevuelo. Overflying is prohibited. Esta zona se publica en AIP-ESPAÑA por acuerdo con Marruecos / This area is published in AIP-ESPAÑA by agreement with Morocco. Permanente / Permanent.

Fig. 43 Ejemplo zonas peligrosas AIP [29]

ZONAS PELIGROSAS / DANGER AREAS		
IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE - Límites laterales IDENTIFICATION AND NAME - Lateral limits	Límite superior Upper limit Límite inferior Lower limit	Observaciones / Remarks (Hora de actividad, tipo de actividad, naturaleza del peligro) (Time of activity, type of activity, nature of hazard)
LED1 CERRO MURIANO (Córdoba) 380400N 0045100W; 380500N 0044800W; 380300N 0044200W; 380000N 0044600W; 380400N 0045100W.	<u>FL 180</u> SFC	Ejercicios de tiro terrestre aire-tierra y bombardeo. /Terrestrial firing air-ground firing and bombing exercises. MON/FRI: HJ, EXC HOL. Otras actividades anunciadas por / Other activities announced by NOTAM. Coordinación con / Coordination with: SEVILLA ACC.

Fig. 44 Ejemplo zonas peligrosas AIP [29]

ZONAS RESTRINGIDAS / RESTRICTED AREAS		
IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE - Límites laterales IDENTIFICATION AND NAME - Lateral limits	Límite superior Upper limit Límite inferior Lower limit	Observaciones / Remarks (Hora de actividad, tipo de restricción, naturaleza del riesgo, riesgo de interceptación) (Time of activity, type of restriction, nature of hazard, risk of interception)
GER11 MELILLA La totalidad del territorio de soberanía española alrededor del punto / The whole spanish dominion territory around the point 351700N 0025500W.	<u>UNL</u> SFC	Prohibido el sobrevuelo. Overflying is prohibited. Permanente / Permanent. Autorizados los vuelos con destino/procedencia Melilla AD / Flights bound for/coming from Melilla AD are permitted.

Fig. 45 Ejemplo zonas restringidas AIP [29]

ZONAS TEMPORALMENTE SEGREGADAS (TSA) / TEMPORARY SEGREGATED AREAS (TSA)		
IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE - Límites laterales IDENTIFICATION AND NAME - Lateral limits	Límite superior Upper limit Límite inferior Lower limit	Tipo de restricción y horarios Type of restrictions and schedule Observaciones / Remarks
TSA 22 ROSAS 413500N 0040900E; 413700N 0043200E 411100N 0042500E; 411200N 0035800E 413500N 0040900E.	FL 280 FL 245	0700 - 1500 (*)

Fig. 46 Ejemplo zonas temporalmente segregadas AIP [29]

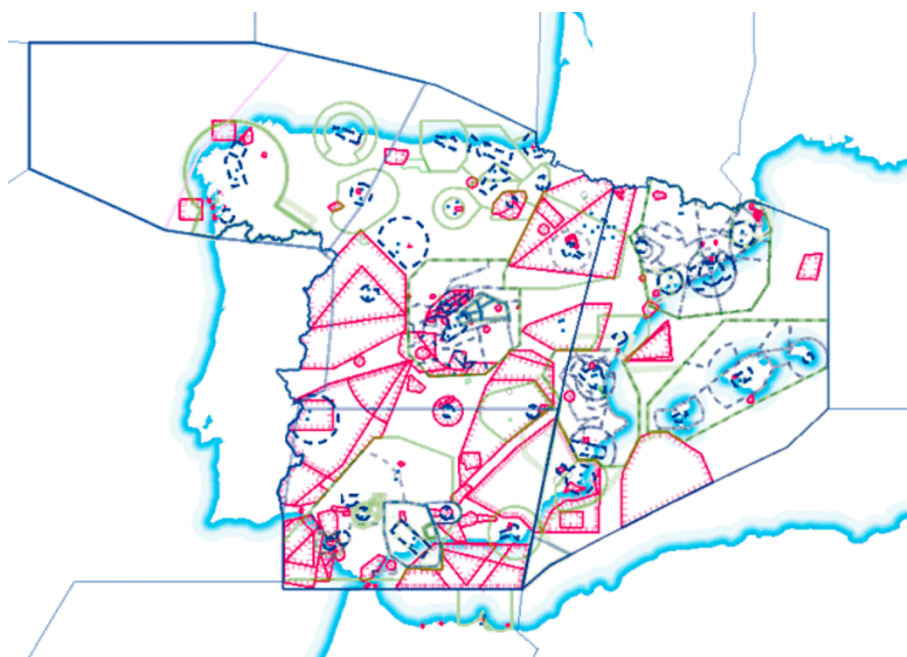


Fig. 47 Mapa Insignia ENAIRE AIP [29]

❖ Normativa aplicable por entidades americanas a modo de ejemplo

Aunque en España no existe una extensa y detallada normativa que se centre en el uso de globos de alta altitud, se incluye a modo de ejemplo y de forma resumida la normativa aplicable por las entidades americanas Federal Aviation Administration (FAA) (Chapter I, Subchapter F, Part 101) y Federal Communications Commissions (FAE) (Chapter I, Subchapter B, Part 22, Subpart H, 22.925) [30].

Nota: El idioma original de la normativa es el inglés, los siguientes puntos no son una traducción literal de la misma, es un resumen de los apartados que mayor relación tienen con los proyectos de globos estratosféricos y su cumplimiento no es aplicable en el territorio español.

- **Limitaciones de operación**

Ninguna persona debe utilizar un globo no tripulado:

- (a) A no ser que esté autorizado por la ATC
- (b) En altitudes donde las nubes u otros fenómenos obstaculicen la visión del mismo.
- (c) En altitudes donde la visibilidad horizontal sea inferior a 5 millas.
- (d) En los primeros 1000 pies de altitud donde existan áreas congestionadas de ciudades.
- (e) En caso de que el impacto del globo o su carga útil contra la superficie cree peligro para personas relativas o no a la misión.

- **Requisitos en el equipamiento y marcado**

Ninguna persona debe utilizar un globo no tripulado:

- (a) A no ser que disponga de dos dispositivos de corte independiente para la separación de la carga útil.
- (b) A no ser que sea rastreable por los radares de tierra en una frecuencia comprendida entre los 200 MHz y 2700 MHz.

❖ **Manipulación del hidrógeno**

El gas de elevación y sustentación con el que es cargado el globo es hidrógeno, un gas inflamable con el que se deben tomar precauciones para su correcta manipulación, siendo dos las normas aplicables a misiones de este tipo:

- *Hidrógeno combustible-Especificaciones del producto*. ISO 14687: 1999/Cor 2001
- *Consideraciones básicas para la seguridad en sistemas de hidrógeno*. ISO/TR 15916:2004

6.1.1 Propiedad intelectual

Se considera autor, a la persona que ha creado una obra científica, literaria o artística, y es a quien pertenecen los derechos de propiedad intelectual de la obra por haberla creado. Por tanto, el creador de este TFG es el titular de los derechos de propiedad intelectual [31].

Son dos los derechos que se le otorgan al autor del trabajo:

- Derechos morales, siendo estos irrenunciables e inalienables y permiten:
 - Decidir la divulgación de su obra y de qué forma.

- Bajo el nombre del autor o no.
- Exigir el reconocimiento como autor.
- Exigir respeto a la integridad de la obra.
- Libertad para modificar la obra.

- Derechos patrimoniales, los correspondientes a los derechos económicos, transferibles, denominados derechos de explotación.

El presente trabajo no es patentable, pues se han hecho diversas investigaciones sobre el tema al respecto, habiendo sido estudiado con anterioridad y se han obtenido resultados parecidos a otros ya existentes.

6.2 Entorno Socio-Económico

En este epígrafe, se presentará el presupuesto correspondiente a la elaboración del TFG y el impacto socio-económico del presente estudio, analizando su utilidad en el ámbito práctico y sus consecuencias económicas que su implementación supondría.

6.2.1 Presupuesto para la elaboración del TFG

El presupuesto de un proyecto es uno de los principales pilares junto a la planificación y elaboración para materializar su consecución.

Los costes de un proyecto pueden dividirse, en costes directos e indirectos.

Costes directos

Son los costes que guardan estrecha relación con el estudio o producto desarrollado y pueden ser deducibles desde las primeras fases del proyecto. Estos costes pueden ser resumidos para el presente proyecto en los materiales, el software y costes de personal.

Costes indirectos

Referidos a los costes que no guardan relación directa con el estudio pero que son indispensables para hacerlo tangible. Aunque su cálculo es más complejo, pueden resumirse para este proyecto de manera general en los costes equivalentes al salario del tutor destinados al apoyo del estudiante, el internet utilizado para la búsqueda de información y la depreciación del ordenador empleado. Tanto la conexión a internet como el ordenador, no han sido únicamente usados para el desarrollo de este estudio por lo que la estimación de los costes indirectos lejos de ser detallada será una aproximación mediante cálculos elementales.

$$\text{Amortización} = \text{Precio} \cdot \frac{\text{Horas_Proyecto}}{\text{Vida_útil}} = 1350 \cdot \frac{360}{4 \cdot 365 \cdot 24} = 13,86\text{€}$$

Donde *Horas_Proyecto*, son las horas para la realización del TFG según los 12 créditos académicos que le corresponden y la *Vida_útil* es la vida aproximada del portátil utilizado.

$$\text{Internet} = \text{Precio} \cdot \frac{\text{Horas_Mes_Proyecto_Internet}}{\text{Horas_mes_Internet}} \cdot n^{\circ}\text{Meses} = 30 \cdot \frac{100}{8 \cdot 30} \cdot 3 = 37,5\text{€}$$

Donde *Horas_Mes_Proyecto_Internet*, son las horas mensuales destinadas a la búsqueda de información usando internet, y *Horas_mes_Internet*, las horas del día que podrían destinarse al uso de internet por 30 días correspondientes a un mes.

El resto de costes indirectos (otros costes) se estimarán como el 3% de los costes directos.

En la TABLA 4 se adjunta el presupuesto para la elaboración del TFG.

TABLA 4: COSTES TOTALES DEL PROYECTO

Costes directos	Precio (€)	Costes indirectos	Precio (€)
Matlab Student License	250 €	Amortización	13,86 €
Estudiante (7€/h)	2.520 €	Internet	37,50 €
Globo y componentes	102,00 €	Otros Costes	127 €
Ordenador Mac Book	1.350 €		
Total por costes	4.222 €	Total por costes	178,02 €
Total proyecto	4.400,02 €		

6.2.2 Impacto socio-económico

Como ya se ha mencionado en el capítulo 1, el uso de los globos estratosféricos se ha disparado exponencialmente durante esta última década por su amplio rango de aplicación y ventajas, pero sobre todo por los costes competitivos que supone usar este tipo de vehículos frente a otras aeronaves.

Conocer la temperatura en cada instante del tiempo en el desarrollo de una misión con un globo HAB es crucial pues, aunque es cierto que la diferencia de presupuesto entre un globo y un cohete, avión o satélite es sustancial, no por ello implica que el proyecto en sí sea asequible. Red Bull invirtió en *Stratos* (capítulo 1) aproximadamente 65 millones de dólares [32], las ganancias de Google por su parte, se estiman en 10 mil millones de dólares con la puesta en marcha de su proyecto *Loon*, mientras que el coste de cada globo ronda las decenas de millar [33].

El hecho de subestimar las temperaturas extremas que pueden darse en estos lanzamientos, implica un gran riesgo a la hora de tener en cuenta, los aislantes térmicos necesarios o al seleccionar los equipos electrónicos que se utilizarán para llevarse a cabo los trabajos. Una mala elección de la cámara que se utilizó para retransmitir *Stratos*, o las baterías que la alimentaban, hubiesen supuesto un fracaso absoluto en la misión, la retransmisión en *streaming* no hubiese tenido lugar y los espectadores no habrían podido seguirla, desencadenando en la pérdida del capital y poniendo en riesgo la vida del saltador, ya que su ascenso hubiese sido en vano. Lo mismo sucedería, en el caso de *Google Loon*, si los dispositivos encargados de dar cobertura 4G son inutilizados por congelación, los lanzamientos no tendrían utilidad alguna y el desembolso económico desplomaría la rentabilidad del proyecto.

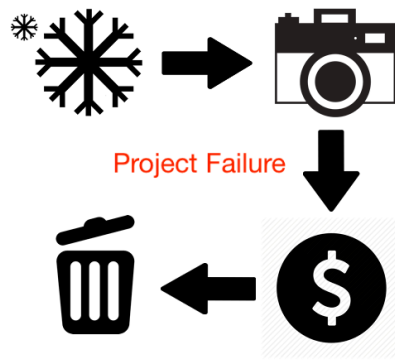


Fig. 48 Fracaso de proyecto por congelación de dispositivos

En definitiva, la inversión en este tipo de estudios es rentable, frente a las pérdidas que el hecho de no hacerlos supondría.

7. CONCLUSIONES

Los lanzamientos de globos de alta altitud se han convertido en algo cotidiano en países como EEUU, y su uso cada vez es más común en el resto de continentes. La gran variedad de misiones que pueden asignarse a estas aeronaves y su atractivo presupuesto frente a otros vehículos aéreos, los hacen idóneos para conocer la Tierra y el espacio, además de cubrir necesidades humanas. Es por ello, por lo que numerosos ingenieros e ingenieras, han empezado a realizar estudios relativos a los mismos décadas atrás, para mejorar su tecnología a fin de hacerlos más eficientes y seguros para emplearlos en nuevas investigaciones. El globo que eleva el sistema y la carga útil transportada, son objeto de estudio en el ámbito de la transferencia de calor, pues las condiciones adversas que se dan en las alturas que estos dispositivos alcanzan, suponen un reto a la hora de concluir satisfactoriamente una misión. La fase de ascenso, conlleva un estudio transitorio en el que los resultados de las temperaturas dependerán del tiempo. Determinar estas temperaturas en función de la altura, implica conocer como es el comportamiento de la atmosfera, para ello ha sido utilizado el modelo de atmósfera estándar ISA. Por otro lado, saber que potencias térmicas intervienen en el balance de energía, es crucial para obtener la temperatura en cada una de las caras de la góndola, donde la colocación de los dispositivos electrónicos en la carga útil con forma de cubo, dará resultados distintos en términos de temperatura (ver Fig. 49).

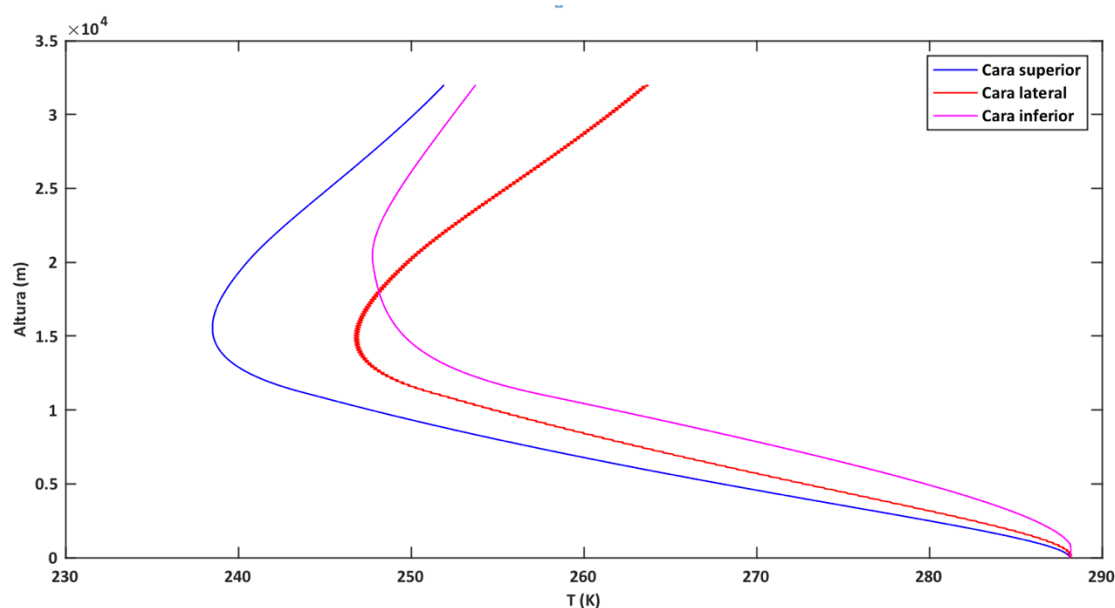


Fig. 49 Temperaturas en las diferentes caras de la góndola

La cara superior, es la que menor temperatura alcanza para la configuración dada. La inexistencia del factor de visión entre esta y la superficie terrestre, hace que la potencia infrarroja absorbida se vea mermada, tendiendo a 0 W cuando la temperatura del cielo comienza a ser muy baja. Por otro lado, la altura solar para la que se han obtenido los resultados es de 25° , esto hace que la radiación solar directa absorbida por esta superficie sea menor que para ángulos mayores.

Con respecto a las dos caras restantes, hasta aproximadamente la mitad de recorrido, la pared lateral presenta temperaturas menores que la inferior. La velocidad de ascenso que incide paralelamente sobre la cara lateral, hace aumentar el efecto de enfriamiento por parte del aire. Además, el elevado factor de visión que existe entre la superficie inferior y el suelo, hace que la potencia infrarroja absorbida sea mayor y con ello su temperatura. A partir de la mitad de recorrido, la disminución de las pérdidas por convección, junto al aumento de la radiación solar directa absorbida por parte de la cara lateral, hacen que la temperatura de esta, sobrepase a la de la pared inferior.

De esto se concluye que, en caso de que la colocación de los equipos electrónicos situados en las paredes de una góndola no afecte al cumplimiento de la misión, lo más recomendable sería disponerlos en la pared lateral o inferior, ya que es la cara superior, la que menores temperaturas presenta.

Tras realizar un barrido paramétrico de las distintas variables, se observa que:

Considerando un cuerpo gris en altas longitudes de onda, emisividades bajas, suponen menores pérdidas por radiación, las cuales son la principal causa del descenso de la temperatura hasta la mitad del recorrido, aunque también lleva a absorber menor potencia infrarroja. Para la cara superior y lateral, este descenso de emisividad, supondría un aumento en las temperaturas, mientras que, para la cara inferior, donde la potencia infrarroja absorbida juega un papel importante, se alcanzarían temperaturas algo menores.

Mayor absorptancia, implica en las tres caras aumentar la temperatura, sobre todo en la cara superior y lateral ya que la radiación solar directa absorbida se vería incrementada. El aumento de esta variable (considerada constante durante todo el ascenso) no es muy notable en la cara inferior, ya que únicamente intervendría en el albedo y como se ha podido comprobar, la potencia absorbida proveniente del reflejo de la superficie terrestre, no es determinante en la alteración térmica por rondar valores próximos a 0 W.

Velocidades de ascenso mayores, para la cara lateral y superior, aumentan el enfriamiento del aire. Disminuir la velocidad implica alcanzar antes el equilibrio térmico con el aire.

Por último, la hora de lanzamiento de un globo estratosférico debe ser tomada en cuenta. Alturas solares bajas, hacen que la cara inferior alcance temperaturas menores por disminuir la absorción de la radiación solar directa, efecto contrario al de la cara lateral. En caso de que el globo ascienda en horario nocturno, implica que no existe radiación solar directa absorbida ni albedo, haciendo que se alcancen temperaturas menores que cuando el sol está presente.

El empleo del software Matlab, permite obtener la solución del balance de energía de forma sencilla y próxima a la realidad como se ha podido comprobar comparándola con la investigación de I. Pérez Grande [19]. Para una mayor precisión, en el siguiente capítulo que cierra el trabajo, se exponen una serie de mejoras que pueden ser implementadas en trabajos futuros.

8. TRABAJOS FUTUROS

El presente modelo puede alcanzar una mayor precisión utilizando el algoritmo de Runge Kutta en Matlab, desarrollado para la resolución de ecuaciones diferenciales. Haciendo uso del mismo, no será necesario emplear la temperatura perteneciente al instante anterior al que se desea calcular, como es el caso del método incremental empleado en el trabajo actual, pues permite obtener una solución directa en cada instante, resolviendo la temperatura de la igualdad diferencial.

Una vez conocidas las temperaturas de cada superficie de la góndola, sería interesante llevar a cabo un estudio térmico, teniendo en cuenta posibles aislantes que puedan utilizarse para proteger los componentes electrónicos. El mecanismo de transferencia de calor por conducción debería ser tomado en cuenta en este caso. El uso de aislantes, hará que no se alcancen temperaturas tan bajas como las del presente trabajo y con ello se comprometerá menos el funcionamiento de los equipos electrónicos, al operar en temperaturas próximas para las que han sido diseñados.

Debe tenerse especial cuidado, con el sobrecalentamiento de dispositivos electrónicos alojados en el interior de aislantes que llegan a ser casi adiabáticos, pues para misiones de larga duración, pueden alcanzarse altas temperaturas causando un posible fallo de los mismos, por lo que un estudio de la convección natural y radiación que pueda darse en el interior de la góndola es vital para evitar este tipo de fallos. Para el estudio deberán tenerse en cuenta correlaciones referentes a cavidades cerradas, presentando un gran reto, pues las tabuladas en los distintos libros y aportaciones de transferencia de calor, tienen sus limitaciones por no tratarse de este caso en concreto. El uso de softwares avanzados como Abaqus o Ansys entre otros, será imperativo para poder resolver el problema.

En adición, si se quiere una mayor precisión térmica, las cavidades en las que se alojan los dispositivos en la góndola o las perforaciones utilizadas por ejemplo para alojar el objetivo de las cámaras, pueden ser objeto de estudio, eso sí, aumentando exponencialmente la complejidad del trabajo, pues en esos casos, deberá estar presente la mecánica de fluidos y el estudio de las presiones para poder determinar las correlaciones de convección a utilizar.

Por último, puede desarrollarse el trabajo de manera más rigurosa, si se incluyen datos atmosféricos reales de la localización exacta en la que vaya a desarrollarse el experimento, además de una variación de los ángulos solares con el tiempo puede ser aportada, y la inclusión del perfil de velocidades del viento (velocidad y dirección) en el modelo, redimensionaría la transferencia de calor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Historia de la meteorología”, *Wikipedia*, 21-10-2017. [En línea] Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_meteorolog%C3%ADa
- [2] M. Johnson, “Scientific Balloons”, *CSBF NASA*, 12-06-2018. [En línea] Disponible en: <https://www.csbf.nasa.gov/balloons.html>
- [3] L. Pacheco, “¿Qué es un globo estratosférico?”, *STRATCAT*, 17-09-2005. [En línea] Disponible en: <http://stratocat.com.ar/artics/globos0.htm>
- [4] PLHZN High Altitude Balloons, “What is a High Altitude Balloon?”, *Youtube*, 13-03-2017. [En línea] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=ckzpSbEKU3c>
- [5] Red Bull Team, “Red Bull Stratos revela sus datos finales”, *Red Bull*, 05-02-2013. [En línea] Disponible en: <https://www.redbull.com/es-es/red-bull-stratos-revela-sus-datos-finales>
- [6] Google, “Internet para todo el mundo con la tecnología de los globos”, *Project Loon*. [En línea] Disponible en: https://x.company/intl/es-419_es/loon/
- [7] NASA, “NASA’s Space Grant Ballooning Project”, *Total Eclipse*, 21-8-2017. [En línea] Disponible en: <https://eclipse2017.nasa.gov/eclipse-ballooning-project>
- [8] J. Marín, “Determinación experimental de la cantidad de calor emitida por un circuito electrónico”, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 25-05-2012.
- [9] “Effect of heat on electronic devices”, *Apiste*. [En línea] Disponible en: http://www.apiste-global.com/enc/technology_enc/detail/id=1262
- [10] “The Effect of Temperature on the Life of Power Electronic Devices”, *CTM MAGNETICS*. [En línea] Disponible en: <http://www.ctmmagnetics.com/the-effect-of-temperature-on-the-life-of-power-electronic-devices/>
- [11] “Temperature effects on battery performance and life”, *Discover Energy Corp*, 01-01-2015. [En línea] Disponible en: https://www.heliant.it/images/FV/ev_temperature_effects.pdf
- [12] H. Franco, “Structural requirements and recomendations for balloon gondola design”, *NASA*, 23-04-2013. [En línea] Disponible en: <https://www.nsbfn.nasa.gov/documents/gondola/OM-220-10-H-A%20Structural%20Rqrmnts%20Gondola%20Design.pdf>
- [13] M. Gabriela Nicola, “Actividad eléctrica asociada a la erupción del complejo volcánico Cordón Caulle durante 2011”, *Meteoro Lógica* vol. 38 N°2 (2013) 121-131. [En línea] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/260838921_Actividad_electrica_asociada_a_la_erupcion_del_complejo_volcanico_Cordon_Caulle_durante_2011
- [14] X.L Xia, D.F Li, C. Sun, L.M. Ruan “Transient thermal behavior of stratospheric balloons at float conditions”, *Advances in Space Research* vol.46, Issue 9, 01-11-2010, Pages 1184-1990.
- [15] K. Zhao, “Superheat simulation of the high altitude scientific balloon during floating flight”, Conference Paper, *College of aerospace Science and engineering*, Changsha, China 06-2013.

- [16] Q. Dai, X. Fang, X. Li, L. Tian, "Performance simulation of high altitude scientific balloons", *Advances in Space Research*. Nanjing, China 05-06-2012
- [17] Y. Zhang, D. Liu, "Influences of initial launch conditions of flight performance of high altitude balloon ascending process", *Advances in Space Research*. Beijing, China 04-05-2015
- [18] J.D. Soler et al. "Thermal design and performance of balloon-borne large aperture submillimeter telescope for polarimetry BLASTPol", *SPIE Ground-based and Airborne Telescopes V*, 23-06-2014.
- [19] M.I. Pérez Grande, A. Sanz, A. Pedro, N. Bezdenejnykh, P. Barthol. "Transient thermal analysis during the ascent phase of a balloon-borne payload. Comparison with SUNRISE test flight measurements", *Applied Thermal Engineering*, v. 29 (n. 8-9); pp. 1507-1513. ISSN 1359-4311. 2009 [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.002>.
- [20] S. Deshpande, "India's First Student-led Near Space Experiment", *Project Apeiro*. [En línea] Disponible en: <http://projectapeiro.com/team.html>
- [21] C. García, "Anexo II. Herramienta Helios". [En línea] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5141/fichero/ANEXO+II.+HERRAMIENTA+HELIOS+.pdf>
- [22] University of Victoria, "The blackbody temperature of a planet", *ARC*. [En línea] Disponible en: http://www.astro.uvic.ca/~venn/A201/math.7.planet_temperature.pdf
- [23] J. Xiong, "Simplified analytical model for predicting the temperature of balloon on high-altitude", *International Journal of Thermal Science*, 05-08-2013.
- [24] F. Incropera, D. Dewitt, T. Bergman, A. Lavine. "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", 6ª Edición, 2007, John Wiley & Sons.
- [25] J.R. Howell, "A catalog of radiation configuration factors", McGraw-Hill, 1982. [En línea] Disponible en: <http://www.thermalradiation.net/tablecon.html>
- [26] Departamento de Ing. Térmica y de Fluidos, Asignatura: Instalaciones de Energías Renovables, UC3M. [En línea] Disponible en: Aula global.
- [27] F. Yang, "Dependence of Land Surface Albedo on Solar Zenith Angle: Observations and Model Parameterization", *Journal of Applied Meteorology and Climatolog*, 01-11-2008. [En línea] Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/citedby/10.1175/2008JAMC1843.1>
- [28] S. Saleh, W. He, "Ascending performance analysis for high altitude zero pressure balloon", *Advances in Space Research*, Beijing, China 04-02-2017
- [29] "Zonas prohibidas, restringidas y peligrosas; zonas temporalmente segregadas", *AIP-España* ENR 5.1-1 WEF 28-MAY-15
- [30] C. de la Barrera Bernad, "Analysis of the aerodynamics and limits of a high altitude balloon", Bachelor Thesis in Aerospace Engineering, Departamento de Térmica y Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, 2018.

[31] Biblioteca UC3M, “Trabajo de Fin de Grado: Evitar el plagio”, *Biblioteca UC3M*, 05-06-2018. [En línea] Disponible en: <http://uc3m.libguides.com/TFG/plagio>

[32] Sport Business, “Red Bull invests 65M\$ in Space Jumps as more than 8M watch on Youtube”, *Sportsbusiness Daily*, 14-10-2012.

[33] J. D’Onfr, “Google thinks its internet balloons could be a \$10 billion business” *Business Insider*, 02-03-2015. [En línea] Disponible en: <https://www.businessinsider.com/google-project-loon-will-be-a-10-billion-business-2015-3?IR=T>

ANEXO A: Código Matlab

```
%Cara superior
A=0.2;
L=A^0.5;
epsilon=0.8;
sigma=5.68*10^(-8);
Te=260;
Rtierra=6371;
Tskynm=239.5;
Tsky50km=3;
Gsnm=700;
Gsout=1360;
rhonm=1.1225;
theta=25;
a=0.3;
alpha=0.2;
V=2.7;
Pdis=20;
T=zeros(1,32000);
m=2;
c=900;
i=1;
H=(0:1:32000);
H1=H(1);
Tamb=zeros(1,32000);
rho=zeros(1,32000);
Tmedia=zeros(1,32000);
Pr=zeros(1,32000);
mu=zeros(1,32000);
Re=zeros(1,32000);
Nu=zeros(1,32000);
K=zeros(1,32000);
h=zeros(1,32000);
Qconv=zeros(1,32000);
Qemitida=zeros(1,32000);
Tsky=zeros(1,32000);
Qinfrabs=zeros(1,32000);
Gs=zeros(1,32000);
Qalbedo=zeros(1,32000);
Qdirecta=zeros(1,32000);
Qsolarabs=zeros(1,32000);
Qabsorbida=zeros(1,32000);
Qnet=zeros(1,32000);
Fbe=1;

%Cálculo de valores iniciales
Tamb(i)=288.15-6.5*H1*0.001;
rho(i) = 1.1225*((288.15-6.5*H1*0.001)/288.15)^4.25588;
T(i)=Tamb(i);
Tmedia(i)=(Tamb(i)+T(i))/2;
Pr(i)=0.804-(3.25*10^(-4))*Tmedia(i);
mu(i)=(1.458*10^(-6))*(Tmedia(i))^(3/2)/(Tmedia(i)+110.4);
Re(i)=(rho(i)*V*L)/mu(i);
Nu(i)=0.102*(Re(i)^0.675)*Pr(i)^(1/3);
K(i)=(2.68151*(10^(-3))*(Tmedia(i))^(3/2))/(Tmedia(i)+245.4*10^(-12/Tmedia(i)));
h(i)=(K(i)*Nu(i))/L;
Qconv(i)=-A*h(i)*(T(i)-Tamb(i));
Qemitida(i)=-A*epsilon*sigma*T(i)^4;
C=log(Tsky50km/Tskynm);
Tsky(i)=Tskynm*exp(C*(H(i)*0.001/50));
Qinfrabs(i)=A*Fbe*epsilon*sigma*(Tsky(i)^4);
Gs(i)=Gsnm+(Gsout-Gsnm)*(1-(rho(i)/rhonm));
Qdirecta(i)=alpha*A*Gs(i)*sind(theta);
Qalbedo(i)=0;
Qsolarabs(i)=Qdirecta(i)+Qalbedo(i);
Qabsorbida(i)=Qinfrabs(i)+Qsolarabs(i);
Qrad(i)=Qabsorbida(i)+Qemitida(i);
Qnet(i)=Qrad(i)+Qconv(i);
```

```

for i=2:(length(H)) %son 32000 metros

    if H(i)<11000
        rho(i) = 1.1225*((288.15-6.5*0.001*H(i))/288.15)^4.25588;
        Tamb(i)=288.15-6.5*H(i)*0.001;
    elseif H(i)<20000
        rho(i) = 0.364*exp(-(H(i)*0.001-11)/6.34162);
        Tamb(i)=216.65;
    else
        rho(i) = 0.088*((216.65+(H(i)*0.001-20))/216.65)^(-35.1632);
        Tamb(i)=216.65+(H(i)*0.001-20);
    end
    Tmedia(i)=(Tamb(i)+T(i-1))/2;
    Pr(i)=0.804-(3.25*10^(-4))*Tmedia(i);
    mu(i)=(1.458*10^(-6))*(Tmedia(i))^(3/2)/(Tmedia(i)+110.4);
    Re(i)=(rho(i)*V*L)/mu(i);
    Nu(i)=0.102*(Re(i)^0.675)*Pr(i)^(1/3);
    K(i)=(2.68151*(10^(-3))*(Tmedia(i)^(3/2)))/(Tmedia(i)+245.4*10^(-
12/Tmedia(i)));
    h(i)=(K(i)*Nu(i))/L;
    Qconv(i)=-A*h(i)*(T(i-1)-Tamb(i));
    Qemitida(i)=-A*epsilon*sigma*T(i-1)^4;
    C=log(Tsky50km/Tskynm);
    Tsky(i)=Tskynm*exp(C*(H(i)*0.001/50));
    Qinfrabs(i)=A*Fbe*epsilon*sigma*(Tsky(i)^4);
    Gs(i)=Gsnm+(Gsout-Gsnm)*(1-rho(i)/rhonm);
    Qalbedo(i)=0;
    Qdirecta(i)=alpha*A*Gs(i)*sind(theta);
    Qsolarabs(i)=Qdirecta(i)+Qalbedo(i);
    Qabsorbida(i)=Qinfrabs(i)+Qsolarabs(i);
    Qrad(i)=Qabsorbida(i)+Qemitida(i);
    Qnet(i)=Qrad(i)+Qconv(i);
    T(i)=(((Qnet(i)+Pdis)/(m*c))*(H(i)-H(i-1))/V)+T(i-1);
end

%Cara lateral
A=0.2;
L=0.2^0.5;
epsilon=0.8;
sigma=5.68*10^(-8);
Te=260;
Rtierra=6371;
Tskynm=239.5;
Tsky50km=3;
Gsnm=700;
Gsout=1367;
rhonm=1.1225;
theta=25;
a=0.3;
alpha=0.2;
V=2.7;
Pdis=20;
m=2;
c=900;
w=1;
i=1;

%Inicializaci n de variables
T=zeros(1,32000);
Tepsilon1=zeros(1,32000);
H=(0:1:32000);
H1=H(1);
Tamb=zeros(1,32000);
rho=zeros(1,32000);
Tmedia=zeros(1,32000);
Pr=zeros(1,32000);
mu=zeros(1,32000);
Re=zeros(1,32000);

```



```

Nu=zeros(1,32000);
K=zeros(1,32000);
h=zeros(1,32000);
Qconv=zeros(1,32000);
Qemitida=zeros(1,32000);
Tsky=zeros(1,32000);
Qinfrabs=zeros(1,32000);
Gs=zeros(1,32000);
Qalbedo=zeros(1,32000);
Qdirecta=zeros(1,32000);
Qsolarabs=zeros(1,32000);
Qabsorbida=zeros(1,32000);
Qnet=zeros(1,32000);
Fbe=zeros(1,32000);
Xt=zeros(1,32000);
giro=zeros(1,32000);

%Cálculo de valores iniciales
Tamb(i)=288.15-6.5*H1*0.001;
rho(i) = 1.1225*((288.15-6.5*H1*0.001)/288.15)^4.25588;
T(i)=Tamb(i);
Tmedia(i)=(Tamb(i)+T(i))/2;
giro(i)=1;
Xt(i)=(Rtierra*1000+H(i))/(Rtierra*1000);
Fbe(i)=(1/2)-((2*sqrt(2))/pi)*sqrt(Xt(i)-1);
Pr(i)=0.804-(3.25*10^(-4))*Tmedia(i);
mu(i)=((1.458*10^(-6))*(Tmedia(i))^(3/2))/(Tmedia(i)+110.4);
Re(i)=(rho(i)*V*L)/mu(i);
%Placa plana, flujo externo paralelo a pared plana
Nu(i)=0.664*(Re(i)^0.5)*Pr(i)^(1/3);
K(i)=(2.68151*(10^(-3))*(Tmedia(i)^(3/2)))/(Tmedia(i)+245.4*10^(-
12/Tmedia(i)));
h(i)=(K(i)*Nu(i))/L;
Qconv(i)=-A*h(i)*(T(i)-Tamb(i));
Qemitida(i)=-A*epsilon*sigma*T(i)^4;
C=log(Tsky50km/Tskynm);
Tsky(i)=Tskynm*exp(C*(H(i)*0.001/50));
Qinfrabs(i)=A*epsilon*Fbe(i)*sigma*(Te^4)+A*(1-
Fbe(i))*epsilon*sigma*(Tsky(i)^4);
Gs(i)=Gsnm+(Gsout-Gsnm)*(1-(rho(i)/rhonm));
Qdirecta(i)=alpha*A*Gs(i)*cosd(theta);
Qalbedo(i)=alpha*a*A*Fbe(i)*Gs(i)*(sind(0.9*theta)^(3/2));
Qsolarabs(i)=Qdirecta(i)+Qalbedo(i);
Qabsorbida(i)=Qinfrabs(i)+Qsolarabs(i);
Qrad(i)=Qabsorbida(i)+Qemitida(i);
Qnet(i)=Qrad(i)+Qconv(i);

for i=2:(length(H)) %son 32000 metros
    %Modelo ISA ambient air temperature
    if H(i)<11000
        rho(i) = 1.1225*((288.15-6.5*H(i)*0.001)/288.15)^4.25588;
        Tamb(i)=288.15-6.5*H(i)*0.001;
    elseif H(i)<20000
        rho(i) = 0.364*exp(-(H(i)*0.001-11)/6.34162);
        Tamb(i)=216.65;
    else
        rho(i) = 0.088*((216.65+(H(i)*0.001-20))/216.65)^(-35.1632);
        Tamb(i)=216.65+(H(i)*0.001-20);
    end
    Tmedia(i)=(Tamb(i)+T(i-1))/2;
    Pr(i)=0.804-(3.25*10^(-4))*Tmedia(i);
    mu(i)=((1.458*10^(-6))*(Tmedia(i))^(3/2))/(Tmedia(i)+110.4);
    Re(i)=(rho(i)*V*L)/mu(i);
    Nu(i)=0.664*(Re(i)^0.5)*Pr(i)^(1/3);
    K(i)=(2.68151*(10^(-3))*(Tmedia(i)^(3/2)))/(Tmedia(i)+245.4*10^(-
12/Tmedia(i)));
    h(i)=(K(i)*Nu(i))/L;
    Qconv(i)=-A*h(i)*(T(i-1)-Tamb(i));
    Xt(i)=(Rtierra*1000+H(i))/(Rtierra*1000);
    Fbe(i)=(1/2)-((2*sqrt(2))/pi)*sqrt(Xt(i)-1);

```

```

    Qemitida(i)=-A*epsilon*sigma*T(i-1)^4;
    C=log(Tsky50km/Tskynm);
    Tsky(i)=Tskynm*exp(C*(H(i)*0.001/50));
    Qinfrabs(i)=A*epsilon*Fbe(i)*sigma*(Te^4)+A*(1-
Fbe(i))*epsilon*sigma*(Tsky(i)^4);
    Gs(i)=Gsnm+(Gsout-Gsnm)*(1-rho(i)/rhonm);
    Qalbedo(i)=alpha*a*A*Fbe(i)*Gs(i)*sind(0.9*theta)^(3/2);
    %Qdirecta(i)=alpha*A*Gs(i)*cosd(theta);
    giro(i)=cos(w*((H(i)-H(1))/V)*(1/60)*2*pi);
    if giro(i)>0;
    Qdirecta(i)=alpha*A*Gs(i)*cosd(theta)*cos(w*((H(i)-H(1))/V)*(1/60)*2*pi);
    else
    Qdirecta(i)=0;
    end
    Qsolarabs(i)=Qdirecta(i)+Qalbedo(i);
    Qabsorbida(i)=Qinfrabs(i)+Qsolarabs(i);
    Qrad(i)=Qabsorbida(i)+Qemitida(i);
    Qnet(i)=Qrad(i)+Qconv(i);
    T(i)=(((Qnet(i)+Pdis)/(m*c))*(H(i)-H(i-1))/V)+T(i-1);
end

%Cara inferior
A=0.2;
Perimetro=4*sqrt(A);
L=A/Perimetro;
epsilon=0.8;
sigma=5.67*10^(-8);
Te=260;
Rtierra=6371;
Tskynm=239.5;
Tsky50km=3;
Gsnm=700;
Gsout=1360;
rhonm=1.1225;
theta=25;
a=0.3;
alpha=0.2;
Qdirecta=0;
V=2.7;
g=9.81;
Pdis=20;
T=zeros(1,32000);
m=2;
c=900;
i=1;
H=(0:1:32000);
H1=H(1);
Tamb=zeros(1,32000);
rho=zeros(1,32000);
Tmedia=zeros(1,32000);
Pr=zeros(1,32000);
mu=zeros(1,32000);
Re=zeros(1,32000);
Nu=zeros(1,32000);
K=zeros(1,32000);
h=zeros(1,32000);
Qconv=zeros(1,32000);
Qemitida=zeros(1,32000);
Tsky=zeros(1,32000);
Qinfrabs=zeros(1,32000);
Gs=zeros(1,32000);
Qalbedo=zeros(1,32000);
Qsolarabs=zeros(1,32000);
Qabsorbida=zeros(1,32000);
Qnet=zeros(1,32000);
Fbe=zeros(1,32000);
beta=zeros(1,32000);
Gr=zeros(1,32000);
Ra=zeros(1,32000);

```

```

%Cálculo de valores iniciales
Fbe(i)=1/((H(i)*0.001+Rtierra)/Rtierra)^2;
Tamb(i)=288.15-6.5*H1*0.001;
rho(i) = 1.1225*((288.15-6.5*H1*0.001)/288.15)^4.25588;
T(i)=Tamb(i);
Tmedia(i)=(Tamb(i)+T(i))/2;
Pr(i)=0.804-(3.25*10^(-4))*Tmedia(i);
mu(i)=((1.458*10^(-6))*(Tmedia(i))^(3/2))/(Tmedia(i)+110.4);
Re(i)=(rho(i)*V*L)/mu(i);
beta(i)=1/Tmedia(i);
Gr(i)=(g*beta(i)*(T(i)-Tamb(i))*(L^3))/(mu(i)^2);
Ra(i)=Gr(i)*Pr(i);
Nu(i)=0.27*Ra(i)^(1/4);
K(i)=(2.68151*(10^(-3))*(Tmedia(i)^(3/2)))/(Tmedia(i)+245.4*10^(-
12/Tmedia(i)));
h(i)=(K(i)*Nu(i))/L;
Qconv(i)=-A*h(i)*(T(i)-Tamb(i));
Qemitida(i)=-A*epsilon*sigma*T(i)^4;
C=log(Tsky50km/Tskynm);
Tsky(i)=Tskynm*exp(C*(H(i)*0.001/50));
Qinfrabs(i)=A*epsilon*Fbe(i)*sigma*(Te^4)+A*(1-
Fbe(i))*epsilon*sigma*(Tsky(i)^4);
Gs(i)=Gsnm+(Gsout-Gsnm)*(1-(rho(i)/rhonm));
Qalbedo(i)=alpha*a*A*Fbe(i)*Gs(i)*sind(0.9*theta)^(3/2);
Qsolarabs(i)=Qdirecta+Qalbedo(i);
Qabsorbida(i)=Qinfrabs(i)+Qsolarabs(i);
Qrad(i)=Qabsorbida(i)+Qemitida(i);
Qnet(i)=Qrad(i)+Qconv(i);
for i=2:(length(H)) %son 32000 metros

    if H(i)<11000
        rho(i) = 1.1225*((288.15-6.5*0.001*H(i))/288.15)^4.25588;
        Tamb(i)=288.15-6.5*H(i)*0.001;
    elseif H(i)<20000
        rho(i) = 0.364*exp(-(H(i)*0.001-11)/6.34162);
        Tamb(i)=216.65;
    else
        rho(i) = 0.088*((216.65+(H(i)*0.001-20))/216.65)^(-35.1632);
        Tamb(i)=216.65+(H(i)*0.001-20);
    end
    Fbe(i)=1/((H(i)*0.001+Rtierra)/Rtierra)^2;
    Tmedia(i)=(Tamb(i)+T(i-1))/2;
    Pr(i)=0.804-(3.25*10^(-4))*Tmedia(i);
    mu(i)=((1.458*10^(-6))*(Tmedia(i))^(3/2))/(Tmedia(i)+110.4);
    Re(i)=(rho(i)*V*L)/mu(i);
    beta(i)=1/Tmedia(i);
    Gr(i)=(g*beta(i)*(T(i-1)-Tamb(i))*(L^3))/(mu(i)^2);
    Ra(i)=Gr(i)*Pr(i);
    if T(i-1)>Tamb
        Nu(i)=0.27*Ra(i)^(1/4);
        K(i)=(2.68151*(10^(-3))*(Tmedia(i)^(3/2)))/(Tmedia(i)+245.4*10^(-
12/Tmedia(i)));
        h(i)=(K(i)*Nu(i))/L;
        Qconv(i)=-A*h(i)*(T(i-1)-Tamb(i));
    else
        Nu(i)=0.54*Ra(i)^(1/4);
        K(i)=(2.68151*(10^(-3))*(Tmedia(i)^(3/2)))/(Tmedia(i)+245.4*10^(-
12/Tmedia(i)));
        h(i)=(K(i)*Nu(i))/L;
        Qconv(i)=-A*h(i)*(T(i-1)-Tamb(i));
    end
    Qemitida(i)=-A*epsilon*sigma*T(i-1)^4;
    C=log(Tsky50km/Tskynm);
    Tsky(i)=Tskynm*exp(C*(H(i)*0.001/50));
    Qinfrabs(i)=A*epsilon*Fbe(i)*sigma*(Te^4)+A*(1-
Fbe(i))*epsilon*sigma*(Tsky(i)^4);
    Gs(i)=Gsnm+(Gsout-Gsnm)*(1-rho(i)/rhonm);
    Qalbedo(i)=alpha*a*A*Fbe(i)*Gs(i)*sind(0.9*theta)^(3/2);
    Qsolarabs(i)=Qdirecta+Qalbedo(i);
    Qabsorbida(i)=Qinfrabs(i)+Qsolarabs(i);

```

```
Qrad(i)=Qabsorbida(i)+Qemitida(i);  
Qnet(i)=Qrad(i)+Qconv(i);  
  
T(i)=(((Qnet(i)+Pdis)/(m*c))*(H(i)-H(i-1))/V)+T(i-1);  
end
```